



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“PATOLGÍA DEL CONCRETO”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
RICARDO OROZCO PÁRAMO

ASESOR:
JOSÉ CARLOS RUBIO AVALOS

CO-ASESOR DE TESIS:
JOSÉ DE JESÚS PÉREZ BUENO

CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
TECNOLOGICO EN ELECTROQUIMICA S.C.

Morelia, Michoacán. Noviembre 2008



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE
INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL
22/08/06

SE ACEPTA
TOMA DE TESIS

Maipo, N° 1. 27 de agosto de 2006

C. P.D. RICARDO GODOY PÁRAMO
PRESENTE.-

En consecuencia a su atenta solicitud de fecha 8 de agosto de 2006 respecto a la propuesta de tesis para su doctoramiento profesional de Ingeniería Civil, me es grato comunicarle que se acepta el tema:

“PATOLOGÍA DEL CONCRETO”, el cual deberá desarrollarse con el índice siguiente:

- 1.- Introducción
- 2.- Estado del arte.
- 3.- Microestructura del concreto.
- 4.- Alteraciones del concreto
- 5.- Causas y efectos de deterioro y falla en estructuras de concreto y concreto reforzado
- 6.- Tipos de fallas y métodos de análisis
- 7.- Equipo para evaluación patológica del concreto
- 8.- Técnicas de reparación
- 9.- Conclusiones
- 10.- Bibliografía

De igual manera es la comunico que el C. Dr. José Carlos Rubio Javalos, ha sido designado asesor de la tesis.

Se hace notar en tanto que, en cumplimiento a lo establecido por la Ley de profesiones, deberá prestar su servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para su registro como ingeniero profesional.

ATENTAMENTE

Ing. Ricardo Godoy Páramo
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

Rafael Jara

FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL
27/08/06



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE
MEXICO

FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL
OFICIO No. 23408-08

SE DESIGNA MESES ANUAL

C. F.M. ROBERTO PÉREZ CHÁVEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
P R E S E N T E.-

El C. Dr. José Carlos Rubio Ávalos, catedrático de la Facultad de Ingeniería Civil, en fecha de fecha 6 de agosto de 2008, dice a esta Dirección lo siguiente:

"...Por la presente, me permito comunicar a Usted que el P.I.C. RICARDO OROZCO PÁRAMO, entregó su trabajo de tesis titulado "PATOLOGÍA DEL CONCRETO" para la presentación de su examen recepcional, el cual considero listo para su impresión..."

Lo que comunico a Usted para su conocimiento y fines consiguientes. Asimismo, le hago saber que el tema anterior corresponde al Departamento de MATERIALES, y es conveniente que se le designe la siguiente mesa.

PRESIDENTE:	Dr. José Carlos Rubio Ávalos	0603049-7
VOCAL:	Dra. Ella Mercedes Alaraz Guzmán	8008025-3
VOCAL:	M.A. Wendo Martínez Molina	9100198-0
SUPLENTE:	Ing. José Arroyo Osaguena	7300532-7
SUPLENTE:	Ing. Alejandro Parola Amador	9900048-0

ATENTAMENTE
Morelia Mich., 6 de agosto de 2008

ING. RAMIRO GUZMÁN RODRÍGUEZ
DIRECTOR FACULTAD
DE INGENIERÍA
CIVIL
U.N.A.M.

1
2008-08-06

DEDICATORIAS

A Dios, por permitirme realizar esta meta.

A mis padres, José Luis y Teresa gracias por todo su esfuerzo, cansancio, apoyo, comprensión y paciencia.

A mis hermanas Karina y Verónica, gracias por ser parte de mi vida y compartir lo bueno y malo.

A todos mis profesores, de la facultad de Ingeniería Civil por haberme compartido una parte de sus conocimientos, por su tiempo y su paciencia.

A mis amigos Sergio, Arturo Francisco, Alejandro, Gerardo, Luis, Fernando,

Mario, gracias por su amistad.

A Esmeralda, gracias por estar en esos momentos difíciles

A todas aquellas personas que estuvieron conmigo a lo largo de la carrera brindándome su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme ser parte de familia nicolaíta y por la formación obtenida desde que ingrese a ella.

A la Facultad de Ingeniería Civil, aquí fue donde tuve mi formación como profesionista y adquirí muchos de los conocimientos que me formaron como tal.

A mi asesor de tesis José Carlos Rubio Avalos, por brindarme su tiempo, comprensión, apoyo y paciencia durante el presente trabajo.

A mi co-asesor José de Jesús Pérez Bueno, por su apoyo durante el presente trabajo.

ÍNDICE

PATOLOGÍA DEL CONCRETO

Capítulos

1. Introducción.....	1
2. Estado- del-Arte.....	2
2.1 Concreto Hidráulico.....	2
2.2 Historia del Cemento.....	2
2.3 Inspecciones en el Concreto.....	6
2.4 Mantenimiento Preventivo.....	7
2.5 Deterioro Prematuro del Concreto	8
2.6 Patología.....	15
3. Microestructura del Concreto.....	17
3.1 Química del concreto.....	17
3.2 Dosificación en el concreto hidráulico.....	21
4. Macroestructura del Concreto.....	24
4.1 Características Físicas y Químicas.....	25
4.1.1 Granulometría.....	26
4.1.2 Limpieza.....	26
4.1.2.1 Materia orgánica.....	27
4.1.2.2 Partículas Inconvenientes.....	27
4.1.2.3 Densidad.....	27
4.1.2.4 Sanidad.....	27
4.2 Absorción y Porosidad.....	28

4.2.1 Forma de Partícula.....	28
4.2.2 Textura Superficial.....	28
4.3 Reactividad de los Álcalis.....	28
4.4 Influencia de los agregados del concreto.....	29
4.5 Uso del agua.....	30
4.5.1 Características físicas y químicas.....	31
5. Causas y Agentes del Deterioro y Falla en la Estructura del Concreto y Concreto Reforzado.....	36
5.1 Principales causas y formas del deterioro del concreto...	36
5.2 Erosiones.....	36
5.2.1 Por abrasión mecánica.....	36
5.2.2 Por abrasión hidráulica.....	37
5.2.3 Por abrasión cavitación.....	37
5.2.4 Por ataque químico.....	37
5.2.5 Por impacto y frotamiento.....	38
5.3 Agrietamientos.....	38
5.3.1 Estructurales.....	39
5.3.2 No estructurales.....	40
5.3.3 Del concreto en estado plástico (de fraguado).....	40
5.3.4 Del concreto en estado endurecido.....	41
5.4 Daños por fuego.....	47
5.5 Manchas en el concreto.....	50
5.6 Otros Deterioros.....	50
5.6.1 Calavero.....	51
5.6.2 Lixiviación de la cal.....	51
5.6.3 Eflorescencias.....	51
5.6.4 Defectos de construcción.....	52

6 Tipos de Fallas y Métodos de Análisis.....	54
6.1 Clasificación de grietas por su actividad.....	54
6.2 Clasificación de las grietas por su abertura.....	54
6.3 Métodos de ensayo no destructivo en estructuras del concreto.	55
6.4 Técnicas basadas en la propagación de ondas.....	56
6.5 Emisión acústica.....	57
6.6 Termografía por infrarrojos.....	58
6.7 Tomografía del concreto hidráulico.....	58
6.8 Ensayo del concreto a compresión.....	59
7 Equipo para Evaluación Patológica del Concreto.....	62
7.1 Esclerómetro.....	62
7.1.1 Esclerómetro digital.....	63
7.2 Equipo de ultrasonido.....	64
7.2.1 Alcances.....	64
7.2.2 Generalidades.....	64
7.2.3 Utilización.....	65
7.2.4 Ventajas y desventajas del equipo.....	72
7.3 Equipo para medir la corrosión.....	73
8 Técnicas de Reparación.....	75
8.1 Tratamientos de grietas activas.....	75
8.2 Tratamiento de grietas inactivas.....	78
8.3 Tratamiento de grietas según su humedad.....	81
8.4 Reparación de concreto armado atacado por corrosión....	93
Conclusiones.....	96
Bibliografía.....	97

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es visualizar de manera clara y objetiva de los daños que se producen en el concreto hidráulico, para poder tener una visión mas amplia sobre este tema es necesario conocer la micro-estructura del cemento, es decir los elementos químicos que producen las reacciones que influyen en el comportamiento del concreto hidráulico desde el punto de vista físico, químico y mecánico y a que en el concreto hidráulico producen una variedad de daños ocasionados por diferentes factores comunes tales como el clima, procedimientos de elaboración, materiales utilizados para su elaboración, corrosión de elementos estructurales, agrietamiento por impacto, etc.

El Concreto es uno de los materiales mas utilizados actualmente en la industria de la construcción debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, ya que es un material muy resistente a esfuerzos de compresión, además de que se puede moldear a casi cualquier forma que uno requiera, entre las construcciones de obra civil mas utilizado están las siguientes: Edificios, puentes, pavimentos, presas, casas habitación y en algunas carreteras.

Su preparación resulta de la mezcla de uno o más conglomerantes (generalmente cemento) con materiales pétreos (grava, y arena), agua y eventualmente, aditivos y adiciones. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla.

La patología del concreto es un tema muy investigado en la industria de la construcción, ya que se adquieren nuevas técnicas y productos para la reparación del concreto hidráulico, así como instrumentos para poder detectar los daños que se presentan en el concreto hidráulico, de que tipo son los deterioros. Desafortunadamente existen deterioros o daños que se presentan en estructuras de concreto hidráulico que ya no es posible repararlos, esto debido a la magnitud del daño que se presenta en dichas estructuras, por tal motivo es necesario demoler parcial o totalmente la edificación en cuestión. Para evitar en un gran porcentaje que se presenten estos casos se le puede dar un mantenimiento preventivo al concreto hidráulico, también se pueden implementar inspecciones periódicas para conocer a tiempo si existe un daño en concreto ya sea durante la elaboración de la estructura o posterior a esta.

2 ESTADO-DEL-ARTE

2.1 Concreto hidráulico

Definición

El concreto se puede definir en un sentido general como un cuerpo o una masa conformada por un medio aglutinador. Generalmente, este es producto de la reacción entre el cemento hidráulico y agua. Sin embargo, hoy día esta definición abarca una amplia gama de productos; hay concretos hechos con diferentes tipos de cemento: puzolana, ceniza, escoria de alto horno, aditivo "dosificado", sulfuro, ingredientes para mezcla, polímeros y fibras entre otros. Además, esos concretos pueden ser calentados, curados al vapor, en autoclaves tratados al vacío, comprimidos hidráulicamente, sometidos a choques y vibraciones, forzados a presión y pulverizados. Posteriormente veremos más a detalle la micro-estructura y la macro estructura del concreto. ⁽¹⁵⁾

La relación entre los componentes de la mezcla, toma en cuenta en principio, que el concreto está constituido por dos fases: pasta de cemento hidratado y agregado; en consecuencia, las propiedades del concreto estarán definidas por las propiedades de las dos fases y por la presencia de la interface entre ellos. ⁽¹⁵⁾

2.2 Historia del cemento

Un breve recorrido por la historia del cemento, hacia el año 700 A.C. los etruscos utilizan mezclas de puzolana y cal para hacer un mortero. Ya en el año 100 A.C. los romanos utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer concreto de resistencias a compresión de 5 Mpa. Hasta el año 1750 sólo se utilizan los morteros de cal y materiales puzolánicos (tierra de diatomeas, harina de ladrillos etc.) ⁽¹⁵⁾

Hacia 1750-1800 se investigan mezclas calcinadas de arcilla y caliza. Smeaton compara en el año 1756 el aspecto y dureza con la piedra de Portland al sur de Inglaterra. 40 años más tarde, Parker fabrica cemento natural aplicándose entonces el vocablo "cemento" (anteriormente se interpretaba como "caement" a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras). Vicat explica en 1818 de manera científica el comportamiento de estos "conglomerantes". En 1824, Aspdin patenta el cemento portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que le recuerdan a las piedras de Portland. Hasta la aparición del mortero hidráulico que auto endurecía, el mortero era preparado en un mortarium (sartén para mortero) por percusión y rotura, tal como se hace en la industria química y farmacéutica. ⁽¹⁵⁾

Entre los años 1825-1872 aparecen las primeras fábricas de cemento en Inglaterra, Francia y Alemania.⁽¹⁵⁾

En el año 1880 se estudian las propiedades hidráulicas de la escoria de alto horno.⁽¹⁵⁾

En el año 1890 aparecen las primeras fábricas de cemento en España.⁽¹⁵⁾

En el año 1980 hay 1500 fábricas que producen cerca de 800 millones de toneladas/año.⁽¹⁵⁾

Hoy en día el cemento es la cola o "conglomerante" más barato que se conoce. Mezclado adecuadamente con los áridos y el agua forma el concreto, una roca amorfa artificial capaz de tomar las más variadas formas con unas prestaciones mecánicas a compresión muy importantes. Las resistencias a tracción pueden mejorarse con la utilización de armaduras (concreto armado).⁽¹⁵⁾

El vocablo "clinker" da nombre al producto intermedio en la fabricación del cemento, principal componente de este último. Se trata del producto obtenido por calcinación a 1500°C de una mezcla de caliza y arcilla. Este producto producía al deslizarse por los hornos rotatorios un ruido "clink, clink,..." del que toma el nombre onomatopéyico de "clinker".⁽¹⁵⁾

La palabra "mortero" viene del vocablo romano "mortarium" que significa sartén para mortero, dónde se preparaba por percusión el antiguo mortero romano.⁽¹⁵⁾

Proceso productivo

1ª Etapa -Preparación de las materias primas

Las materias primas básicas (caliza, pizarra o grava) se extraen de canteras a cielo abierto por medio de voladuras controladas. Posteriormente, se cargan y transportan en camiones de gran tonelaje a las trituradoras donde se fragmentan hasta un tamaño aproximado de 50 mm.; luego se almacenan en zonas independientes en naves de materias primas.⁽¹⁵⁾

Además de estas materias primas básicas, también se utilizan, en proporción minoritaria, otros productos que aportan calcio, silicio, aluminio o hierro, tales como cascarilla, arena, escoria, cenizas, etc., que se adquieren en el exterior, y que se utilizan para ajustar con mayor precisión la composición química del "Crudo".⁽¹⁵⁾

Estas materias primas se dosifican de manera controlada con básculas y se introducen de manera conjunta a los molinos. La proporción relativa de cada

Componente se ajusta de manera automática, en base a los resultados de los análisis efectuados por analizadores de rayos X. ⁽¹⁵⁾

El material que sale del molino, llamado ""Harina de Crudo"", es muy fino y se Almacena en silos cerrados en donde se lleva a cabo un proceso de homogeneización por medio de la introducción de aire a presión a través del fondo del silo. ⁽¹⁵⁾

2ª Etapa - Cocción: El Clinker

La "harina de crudo" se introduce a un intercambiador de calor donde se lleva a cabo un proceso de calentamiento progresivo hasta alcanzar los 1000°C. En este proceso, y en primer lugar, el crudo se seca, luego se deshidrata y finalmente se descarbonata. Este proceso de calentamiento del crudo se realiza por intercambio de calor entre los gases calientes ascendentes procedentes de la combustión en el horno, y la materia cruda descendente que recorre el intercambiador. ⁽¹⁵⁾

A continuación la materia entra en el horno, que es un tubo de dimensiones variables pero que oscila entre 45-60 metros de longitud y 3-5 metros de diámetro, girando a menos de 3 rpm. En el interior del horno se produce la combustión controlada de un combustible hasta alcanzar temperaturas de llama de hasta 2000°C. ⁽¹⁵⁾

Dentro el horno, el crudo sigue aumentando de temperatura hasta alcanzar un máximo de 1.450°C, necesario para la correcta formación de los componentes responsables de las propiedades mecánicas de los cementos. El material que sale del horno tiene aspecto de gránulos redondeados y se conoce con el nombre de ""clinker"". ⁽¹⁵⁾

Para congelar su estructura cristalina y estabilizar los componentes formados a 1450°C, el clinker se enfría con aire por debajo de los 120°C. Son necesarios 1560 Kg. de crudo para obtener 1000 Kg. de clinker. Una composición típica del clinker es:

- 64% en CaO (Óxido cálcico)
- 6% en Al₂O₃ (Óxido de aluminio)
- 20% en SiO₂ (Dióxido de Silicio)
- 3% en Fe₂O₃ (Trióxido de Hierro)
- 7% Otros elementos

Los gases resultantes del proceso de combustión se emiten a la atmósfera a través de una chimenea a una temperatura inferior a 120°C, después de haber sido previamente filtrados a través de filtros electrostáticos o de mangas que retienen más del 99,9% del polvo arrastrado. ⁽¹⁵⁾

El calor contenido en los gases de salida es reutilizado en el proceso de secado y molienda del crudo y de los combustibles. ⁽¹⁵⁾

3ª Etapa - Molienda: El Cemento El cemento está constituido por:

- Clinker
- Componentes principales, tales como; Escoria de Alto Horno, Humo de Sílice, Puzzolana, Cenizas volantes, y Caliza.
- Componentes minoritarios
- Regulador de fraguado ⁽¹⁵⁾

La proporción de cada componente depende del tipo concreto de cemento fabricado. Los distintos componentes se almacenan en zonas separadas, se dosifican por medio de básculas y se añaden de manera conjunta y continuada al molino de cemento. ⁽¹⁵⁾

Al igual que en el crudo, la proporción relativa de cada componente se ajusta de manera automática en base a los resultados de los análisis efectuados por analizadores de rayos X. ⁽¹⁵⁾

En el proceso de molienda, los componentes se muelen, se entremezclan íntimamente y el material se hace pasar por separadores. ⁽¹⁵⁾

Si el cemento posee las características físico-químicas necesarias se almacena en silos estancos. En caso contrario, se reenvía al molino para continuar su molienda. El cemento así producido y almacenado se suministra en sacos (42.5Kg. y algunos de 20 Kg.) o a granel (en camiones cisternas de 25 ton. aprox.). ⁽¹⁵⁾

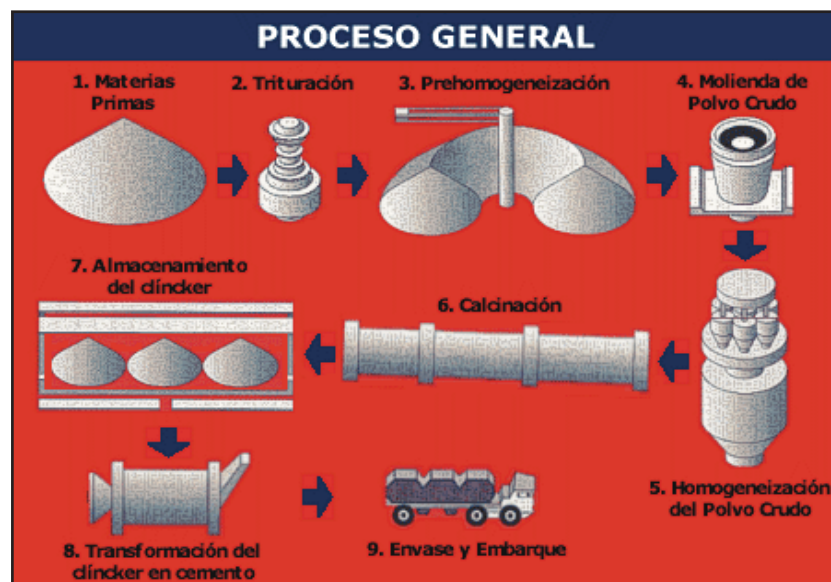


Figura 1. Esquema de proceso de elaboración del cemento

Obtenido en www.cruzazul.com.mx



Figura 2. Planta Productora de cemento

Obtenido en www.cemex.com

2.3 Inspecciones en el concreto

La realización de inspecciones periódicas al concreto en servicio, es de su máxima importancia, ya que debido a ello se puede evaluar su capacidad estructural y funcional para evitar posibles accidentes debido a una falla que se presente en este elemento estructural. ⁽³⁾

Para evitar que se presente una falla o algún tipo de deterioro en el concreto, es necesario proporcionarle un mantenimiento preventivo, esto con la finalidad de que no se exponga innecesariamente a las condiciones adversas del medio ambiente que puedan afectar al concreto. ⁽³⁾

En general los programas de inspección evalúan a las estructuras tomando en cuenta los criterios de diseño, el proceso constructivo y el comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo. Básicamente las inspecciones consisten en exámenes visuales en el sitio para juzgar el estado de las estructuras, y si es necesario, efectuar una inspección más profunda en la que se incluyen estudios analíticos, de laboratorio y de campo. A partir de los resultados que muestren los distintos estudios se evaluará si existe necesidad de efectuar algún tipo de medida preventiva o correctiva y cuando debe realizarse. ⁽³⁾

Tipos de Inspección

Hay tres tipos básicos de inspección:

- Inspecciones de rutina General
- Inspecciones de rutina Específica
- Inspecciones Especiales

Estos tipos de inspección difieren entre si en los que se refiere a frecuencia, propósito, grado de esfuerzo requerido, personal que hace las inspecciones y variedad de problemas considerados. ⁽³⁾

A continuación analizaremos brevemente en que consiste cada uno de los tipos de inspección al concreto.

I. Inspecciones de rutina general

Consisten en un examen visual que realiza personal del área civil. Estas inspecciones proporcionan una idea permanente de la apariencia general y del funcionamiento de las estructuras con la posibilidad de identificar oportunamente algún cambio observable. Entre los aspectos que deben de recibir más atención están las condiciones inusuales, los cambios repentinos en las condiciones previamente conocidas y nuevos defectos obvios, tales como filtraciones, grietas y desplazamientos.

II. Inspecciones de rutina Especifica

Consiste en realizar una búsqueda detallada de evidencias de deterioro en el concreto o de comportamientos estructurales inseguros. Estas inspecciones son exámenes de campo de todas las características físicas de las estructuras civiles.

III. Inspecciones de rutina Especial

Este tipo de inspecciones se realizan inmediatamente después de eventos extraordinarios, como pueden ser: sismos, huracanes, incendios entre otros o a la aparición de patrones de comportamiento no esperados. Las inspecciones se llevan a cabo con el propósito de determinar si existen daños debidos a algún evento, la magnitud de estos y la prioridad de las reparaciones. En este tipo de inspección es necesaria la participación de personal especializado y se debe contar con todos los reportes previos que se hayan generado y se consideren importantes. ⁽³⁾

2.4 Mantenimiento preventivo

La prevención es un aspecto muy importante en este tema de concreto ya que es la base de todas las acciones de conservación para evitar que algunas causas ya mencionadas (sismo, incendio, huracanes y hasta el clima en el que se encuentra) puedan afectar de manera considerable a el concreto. Esto exige una vigilancia extrema para distinguir los problemas iniciales. ⁽³⁾

El mantenimiento preventivo del concreto consiste en la aplicación de medidas destinadas a protegerlo contra el deterioro prematuro debido al envejecimiento, agentes agresivos o acciones que causen su detrimento. ⁽³⁾

En términos prácticos, se considerara que en tanto o no se manifieste el deterioro, las medidas de protección que se realizan corresponden al campo de la aplicación del mantenimiento preventivo; sin embargo, una vez que existe

evidencia del deterioro, las medidas de protección corresponden al mantenimiento correctivo. ⁽³⁾

2.5 Deterioro prematuro del concreto

Si una estructura de concreto esta bien diseñada, la probabilidad de que sufra deterioro prematuro en condiciones ordinarias de servicio (sin considerar eventos extraordinarios impredecibles) depende de tres factores principalmente:

- a) La calidad original propia del concreto
- b) La severidad de las condiciones de exposición y de servicio
- c) La adecuación que en cada caso existe entre estos dos últimos factores ⁽³⁾

A continuación se analizara brevemente estos factores

- a) La calidad original propia del concreto

La calidad propia del concreto, como se encuentra en la estructura, depende en gran medida de su composición original y de las prácticas seguidas en su fabricación y su utilización. Como consecuencia de eventuales deficiencias en estos aspectos, pueden resultar defectos de calidad, que sin ser evidentes, anticipan el deterioro del concreto bajo determinadas condiciones de exposición y servicio. ⁽³⁾

Entre los posibles defectos de calidad del concreto cabe mencionar los siguientes aspectos:

- Composición inadecuada (cemento, agregados, proporciones)
- Resistencia insuficiente (compresión, tensión)
- Homogeneidad defectuosa (juntas frías, segregación, sangrado)
- Cambios volumétricos excesivos (contracción por secado, cambios de volumen por variaciones de humedad y temperatura)
- Porosidad elevada (permeabilidad y absorción y lixiviación)
- Naturaleza químicamente inestable (reacciones destructivas potenciales entre el cemento y los agregados). ⁽³⁾

- b) Condiciones ordinarias de exposición

Considerando solo las condiciones ambientales correspondientes a los diferentes climas en que de ordinario presentan servicio las estructuras de concreto, tales condiciones pueden clasificarse por categorías, de acuerdo con la intensidad de los efectos perjudiciales que pueden ejercer en el concreto endurecido. En el caso del territorio nacional, es posible definir cuatro condiciones de manera aproximada que son representativas de las que prevalecen en el sur, centro y norte de la República:

- I. Condiciones benignas. Es clima tipo A, según especificación CFE-D8500-01. Clima tropical o semitropical, cálido y húmedo, con temperaturas medias estables. Lluvias entre moderadas y abundantes, repartidas en gran parte del año. Ejemplos de este tipo de clima se encuentran en el sur y sureste de la República. ⁽³⁾
- II. Condiciones moderadas. Este clima es de tipo Cf y Cw especificación CFE-D8500-01. Clima templado, entre húmedo y semiseco, con temperaturas medias moderadamente variables. Lluvias entre escasas y moderadas, limitadas a ciertas épocas del año. Como ejemplo pueden citarse las regiones centro y occidente de la República. ⁽³⁾
- III. Condiciones moderadamente severas. Clima tipo B especificación CFE-D8500-01. Clima con tendencia desértica, entre semiseco y seco, frío en invierno, caluroso en verano y con notables variaciones de temperatura durante el día y la noche. Lluvias entre escasas o nulas, con algunas nevadas durante el invierno. Este tipo de clima se presenta en diversas zonas del norte de la República. ⁽³⁾
- IV. Condiciones ambientales severas. Regiones de alta latitud geográfica, donde las temperaturas invernales son extremadamente bajas y sostenidas; se presentan ocasionalmente en algunas zonas del norte de la República. ⁽³⁾

Aparte de las zonas climáticas, existen tres características ambientales particulares que definen más precisamente el medio en el que la estructura va estar presentando el servicio. Estas son el ambiente marino, industrial y rural. En la especificación CFE-D8500-01 se clasifican como ambientes agresivos a aquellas zonas climáticas que tienen ambiente marino o industrial y los ambientes poco agresivos a las zonas climáticas que tienen ambientes rurales. En dicha especificación se puede consultar esta caracterización para las ciudades más importantes del país, destacando en los ambientes agresivos las ciudades costeras y las ciudades industriales. ⁽³⁾

Condiciones particulares de exposición y de servicio

Independientemente de las condiciones ambientales ordinarias que corresponden a la región donde se ubica la estructura, existen ciertas condiciones particulares de exposición y servicio que solo se producen en puntos o sitios específicos que pueden causar deterioro prematuro al concreto. Tales condiciones pueden ser de origen natural o provocado por el uso que se le da a las estructuras. ⁽³⁾

Entre los casos de estructuras de concreto frecuentemente expuestas a condiciones perjudiciales de esta índole, pueden citarse:

-  Estructuras sometidas a acciones con efectos químicos o físico-químicos.

- Obras de todo tipo, cuya infraestructura tiene contacto con agua o suelo con alto contenido de sulfatos, como ocurre con algunas zonas desérticas, pantanosas o lacustres.
- Estructuras de obras marítimas o portuarias expuestas al contacto con el agua de mar o brisa marina.
- Estructuras de obras hidráulicas expuestas al contacto con aguas puras o que contienen bióxido de carbono disuelto.
- Tuberías de drenaje que conducen desechos industriales.
- Superficie interior de chimeneas en plantas químicas, industriales y termoeléctricas.
- Estructuras de todo tipo, donde existe el riesgo potencial de una reacción destructora entre el cemento y los agregados.⁽³⁾

 Estructuras sometidas a acciones con efectos físicos.

- Estructuras de obras hidráulicas expuestas a flujo de agua con alta velocidad y/o con arrastre de sólidos.
- Conductos de obras hidráulicas sometidos a presión hidrostática constante, variable u oscilante.
- Pisos y pavimentos expuestos a maniobras pesadas o tráfico intenso.
- Cimentaciones de maquinaria y equipo sometidas a vibración o calentamiento.
- Estructuras de todo tipo sometidas a todo tipo de humedad y secado y/o de calentamiento y enfriamiento.⁽³⁾

 Adecuación de la calidad del concreto a las condiciones de exposición y servicio.

Cuando se planea la construcción de una obra, es responsabilidad del proyectista definir y especificar las características y propiedades que debe poseer el concreto que se utilizara, con objeto de que las estructuras sean resistentes y duraderas para ello, no solo debe estimar correctamente las cargas y solicitaciones, sino también tomar en cuenta las condiciones de exposición en que las estructuras presentan servicio.⁽³⁾

Con base a estas especificaciones, el constructor debe seleccionar los componentes adecuados para el concreto y diseñar la mezcla correspondiente. Si las condiciones ambientales previstas son benignas o moderadas y si no existen condiciones perjudiciales específicamente aplicables al caso, el diseño de la mezcla se realiza con el solo fin de obtener la resistencia de proyecto especificado. De otro modo, bajo condiciones de exposición y servicio que representen cierto riesgo de deterioro prematuro en el concreto, el diseño de la mezcla debe efectuarse de acuerdo con el criterio de durabilidad que tales condiciones demanden.⁽³⁾

Normalmente, este criterio de durabilidad establece requisitos especiales en cuanto a la composición químicas del cemento, la calidad de los agregados y

Del agua, y el valor máximo permisible de la relación agua/cemento que debe emplearse. Esto ultimo por que dicha relación determina el grado de porosidad resultante en el concreto endurecido que es una característica índice de la Calidad del concreto y en consecuencia, con su necesidad de recibir mantenimiento. ⁽³⁾

A manera de información complementaria en la siguiente tabla se mencionan las diferentes clases de cemento que se utilizan en México:

Tipo	Nombre	Aplicación
I	Normal	Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.
IA	Normal	Uso general, con inclusor de aire.
II	Moderado	Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
IIA	Moderado	Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
III	Altas resistencias	Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
IIIA	Altas resistencias	Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
IV	Bajo calor de hidratación	Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
V	Resistente a la acción de los sulfatos	Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Tabla 1. Clases de cemento en México

Obtenido en Guía del usuario Cemex Concretos

TIPO I

Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. ⁽⁴⁾

TIPO II

El cemento Portland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos). ⁽⁴⁾

Genera normalmente menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación puede especificarse a opción del comprador.

En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc. ⁽⁴⁾

TIPO III

Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas. ⁽⁴⁾

TIPO IV

El cemento Portland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas. ⁽⁴⁾

Cementos hidráulicos mezclados

Estos cementos han sido desarrollados debido al interés de la industria por la conservación de la energía y la economía en su producción.

La norma ASTM C 595 reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

Cemento Portland de escoria de alto horno - Tipo IS.

Cemento Portland puzolana - Tipo IP y Tipo P.

Cemento de escoria - Tipo S.

Cemento Portland modificado con puzolana - Tipo I (PM).

Cemento Portland modificado con escoria - Tipo I (SM). ⁽⁴⁾

Tipo IS

El cemento Portland de escoria de alto horno se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Para producir este tipo de cemento, la escoria del alto horno se muele junto con el cinquiavo de cemento Portland, o puede también molerse en forma separada y luego mezclarse con el cemento. El contenido de escoria varía entre el 25 y el 70% en peso. ⁽⁴⁾

Tipo IP y Tipo P

El cemento Portland IP puede ser empleado en construcciones en general y el tipo P se utiliza en construcciones donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. El tipo P se utiliza normalmente en estructuras masivas, Como estribos, presas y pilas de cimentación. El contenido de puzolana de estos cementos se sitúa entre el 15 y el 40 % en peso. ⁽⁴⁾

Tipo S

El cemento tipo S, de escoria, se usa comúnmente en donde se requieren resistencias inferiores. Este cemento se fabrica mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- 1) Mezclando escoria molida de alto horno y cemento Portland.
- 2) Mezclando escoria molida y cal hidratada.
- 3) Mezclando escoria molida, cemento Portland y cal hidratada.

El contenido mínimo de escoria es del 70% en peso del cemento de escoria. ⁽⁴⁾

Tipo I (PM)

El cemento Portland tipo I (PM), modificado con puzolana, se emplea en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento se fabrica combinando cemento Portland o cemento Portland de escoria de alto horno con puzolana fina. Esto se puede lograr:

- 1) Mezclando el cemento Portland con la puzolana
- 2) Mezclando el cemento Portland de escoria de alto horno con puzolana
- 3) Moliendo conjuntamente el cinquera de cemento con la puzolana
- 4) Por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado.

El contenido de puzolana es menor del 15% en peso del cemento terminado. ⁽⁴⁾

Tipo I (SM)

El cemento Portland modificado con escoria, TIPO I (SM), se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto. Se fabrica mediante cualquiera de los siguientes procesos:

- 1) Moliendo conjuntamente el cinquera con alguna escoria granular de alto horno.
- 2) Mezclando escoria molida y cal hidratada.

3) Mezclando escoria, cemento Portland y cal hidratada.

El contenido máximo de escoria es del 25% del peso del cemento de escoria.

A todos los cementos mezclados arriba mencionados, se les puede designar la inclusión de aire agregando el sufijo A, por ejemplo, cemento TIPO S-A.

Además, en este tipo de cementos, la norma establece como requisito opcional para los cementos. ⁽⁴⁾

Tipo I (SM), I (PM), IS, IP y los denominados con subfijo MS o MH lo siguiente: moderada resistencia a los sulfatos y/o moderado calor de hidratación y en caso del tipo P y PA, moderada resistencia a los sulfatos y/o bajo calor de hidratación. ⁽⁴⁾

La Norma ASTM C 115 7 establece los requisitos de durabilidad para los cementos hidráulicos cuando se utilicen en aplicaciones especiales o para uso general. Por ejemplo, donde se requieran altas resistencias tempranas, moderada a alta resistencia a los sulfatos, moderado o bajo calor de hidratación y opcionalmente baja reactividad con los agregados reactivos a los álcalis. ⁽⁴⁾

Cementos especiales

Cementos para Pozos Petroleros

Estos cementos, empleados para sellar pozos petroleros, normalmente están hechos de clinker de cemento Portland. Generalmente deben tener un fraguado lento y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas. El Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) establece especificaciones (API 10-A) para nueve clases de cemento para pozos (clases A a la H). Cada clase resulta aplicable para su uso en un cierto rango de profundidades de pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados. También se emplean tipos convencionales de cemento Portland con los aditivos adecuados para modificar el cemento. ⁽⁴⁾

Cementos Plásticos

Los cementos plásticos se fabrican añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total, al cemento Portland de TIPO I ó II durante la operación de molienda. Estos cementos comúnmente son empleados para hacer morteros y aplanados. ⁽⁴⁾

Cementos Portland Impermeabilizados

El cemento Portland impermeabilizado usualmente se fabrica añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato de sodio, de aluminio, u otros, al clinker de cemento durante la molienda final. ⁽⁴⁾

- Otros tipos de cemento

Cementos de Albañilería

Estos son cementos hidráulicos diseñados para emplearse en morteros, para construcciones de mampostería. ⁽⁴⁾

Están compuestos por alguno de los siguientes: cemento Portland, cemento Portland puzolana, cemento Portland de escoria de alto horno, cemento de Escoria, cal hidráulica y cemento natural. Además, normalmente contienen materiales como cal hidratada, caliza, creta, talco o arcilla. ⁽⁴⁾

La trabajabilidad, resistencia y color de los cementos de albañilería se mantienen a niveles uniformes gracias a los controles durante su manufactura. Aparte de ser empleados en morteros para trabajos de mampostería, pueden utilizarse para argamasas y aplanados, mas nunca se deben emplear para elaborar concreto. ⁽⁴⁾

Cementos Expansivos

El cemento expansivo es un cemento hidráulico que se expande ligeramente durante el período de endurecimiento a edad temprana después del fraguado. Debe satisfacer los requisitos de la especificación ASTM C 845, en la cual se le designa como cemento tipo E-1. Comúnmente se reconocen tres variedades de cemento expansivo:

E-1(K) contiene cemento Portland, triáluminosulfato tetracálcico anhidro, sulfato de calcio y óxido de calcio sin combinar.

E-1(M) contiene cemento Portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio.

E-1(S) contiene cemento Portland con un contenido elevado de aluminato tricálcico y sulfato de calcio. ⁽⁴⁾

Cemento Portland Blanco

El cemento Portland blanco difiere del cemento Portland gris únicamente en el color. Se fabrica conforme a las especificaciones de la norma ASTM C 150, normalmente con respecto al tipo I ó tipo III; el proceso de manufactura, sin embargo, es controlado de tal manera que el producto terminado sea blanco.

El cemento Portland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxido de hierro y de manganeso, que son las sustancias que dan el color al cemento gris. ⁽⁴⁾

2.6 Patología

Proviene del griego logos (estudio) y pathos (daño), que para efecto de esta tesis de Patología del Concreto, se encargada del estudio de las fallas y daños

en concreto en su más amplio sentido, es decir, como procesos o estados anormales de causas conocidas o desconocidas.⁽⁷⁾

Las pruebas que mejor demuestran la existencia de una falla se basan principalmente en el examen de una lesión en todos sus niveles estructurales, la evidencia de la presencia de grietas, eflorescencias y corrosión entre otros daños que se presenten.⁽⁷⁾

Para conocer el daño patológico en el concreto se realizan inspecciones a fondo, además de que existe equipo especial con los que se puede conocer a fondo el daño que se presenta en el concreto hidráulico. Estos instrumentos se analizarán en el capítulo 7.

3 MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO

La micro estructura del cemento durante la etapa de solidificación evoluciona como un proceso debido a las reacciones de hidratación que ocurren entre el agua y el cemento. A partir de la caracterización del desarrollo de la micro estructura se pretende conocer las propiedades de la mezcla, relacionando la micro estructura con la macro estructura, y poder predecir el comportamiento de la misma. El proceso de formación de la micro estructura desde un estado de suspensión viscosa agua-cemento hasta convertirse en un sólido rígido poroso.⁽²⁾

En realidad, en los materiales cementicios se generan durante su período de hidratación complejas reacciones que conducen a la formación de una micro-estructura resistente a través del tiempo. La complejidad de estas reacciones, viene dada por la génesis de la partícula de cemento no hidratada, ya que ésta conformada por la combinación de diferentes óxidos, de tal forma que de la arcilla se obtienen Aluminio y Hierro, del cuarzo la Sílice y de la caliza el Calcio. Estos minerales luego de un proceso industrial que incluye su obtención, transporte y cocido, se convierten en el Clinker, el cual luego de ser molido es mezclado con yeso para originar las velocidades de la reacción de hidratación. Es por esto que, la partícula de cemento (cuyo diámetro varía entre el micrón y los 100 micrones) está compuesta por C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF y yeso, siendo éstas las fases de Bogue utilizadas como una simplificación de la química real del proceso y contando cada una de ellas con una tasa de hidratación diferente, con lo cual contribuyen a la complejidad del proceso.⁽²⁾

Es interesante destacar el hecho de la conveniencia del estudio de las propiedades de los cementos desde el punto de vista de la micro estructura, ya que esto sirve para poder extrapolar resultados a nivel macro pero con un conocimiento importante de los procesos internos de la formación del material. Este conocimiento de la micro-estructura, utilizado en la forma correcta, posibilitaría realizar a este nivel pequeños cambios que generarían mejoras en la resistencia, durabilidad y demás propiedades a escala real.⁽²⁾

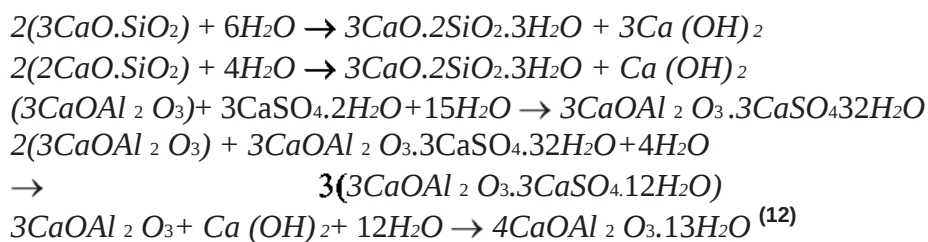
3.1 Química del cemento

Los componentes principales del cemento son: Silicato Tricalcico (C_3S), Silicato Dicalcico (C_2S), Aluminato tricalcico (C_3A), Ferroluminato Tetracalcico (C_4AF) y Yeso (C_3SH_2) cuyas propiedades se muestran en la siguiente tabla.⁽²⁾

Propiedad	Componente	Característica
Comportamiento al fragüe	C_3S C_3A	Controla el fraguado normal Puede causar rigidez prematura
Aumento de temperatura durante hidratación	C_3S C_3A	Responsable de resistencia temprana Contribuye a la resistencia a largo plazo
Desarrollo de resistencia	C_3S C_2S	
Creep y Reducción de Volumen	C_3S , C_2S C_3A , C_4AF	Principal contribución Efectos menores
Durabilidad C3S	C_3S C_3A	Lixiviación de $Ca(OH)_2$ Ataque sulfatos

Tabla 2 Propiedades de los elementos químicos en el cemento
Obtenido en www.uprm.edu/Materiales/Microestructuracemento.pdf

Reacciones de la hidratación idealizada del cemento siendo las más importantes:



El C3S (alita), es el silicato de calcio mas inestable de los presentes en el cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como gel tobermorita y en hidróxido de calcio. (ec. 1) ⁽¹²⁾

Silicato dicalcico (C2 S – belita) al hidratarse también se convierte en gel tobermorita y en hidróxido de calcio pero a diferencia de la ec. 1 se produce menos hidróxido de calcio (ec.2). ⁽¹²⁾

El aluminato de calcio (C3A - Celita) al combinarse con yeso y agua se produce etringita (ec. 3). ⁽¹²⁾

El aluminato de calcio con la etringita y con agua se convierte en monosulfato (ec. 4) ⁽¹²⁾

El aluminato de calcio con hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado (ec. 5) ⁽¹²⁾

Tobermorita gel: Es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de adherencia de esta con los áridos en los morteros y hormigones y, en definitiva de la resistencia mecánica de estos conglomerados, por lo que resulta un constituyente indispensable y siempre positivo. ⁽¹²⁾

Portlandita (hidróxido de calcio): Tiene efectos positivos en que es el encargado de mantener el PH de la pasta en valores altos (12-13) pues actúa como una “reserva alcalina” mantienen al concreto armado protegido contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de los concretos y morteros con áridos calizos ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el de los áridos silicios. ⁽¹²⁾

También tiene efectos negativos tales como: solubilidad en el agua y fácilmente lixiviable por disolución, puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600 °C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura varios de estos aspectos pueden controlarse con la adición de puzolanas –en el microscopio la portlandita se presenta como plaquetas hexagonales a menudo de décimas de micrómetros de ancho pero después se convierten en depósitos masivos. ⁽¹²⁾

Etringita (trisulfoaluminato de calcio): Los cristales de letrinita son de forma alargada generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas formando estructuras que se asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva, pues la genera expansión se encuentra generalmente en fisuras y grietas y se produce edades tardías (mayores a 28 días) ⁽¹²⁾

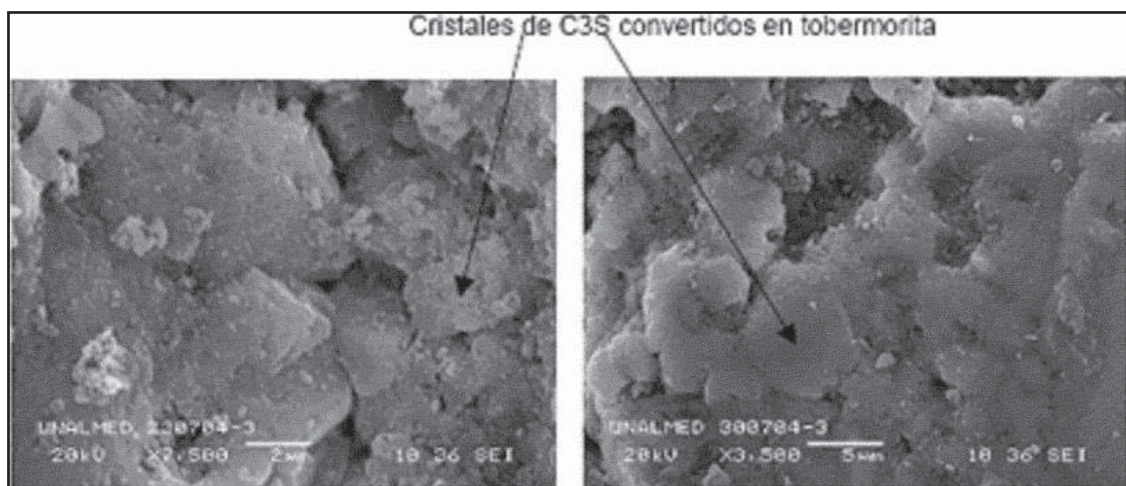


Figura 3 Formación de gel de tobermorita
Obtenido en www.redalyc.org

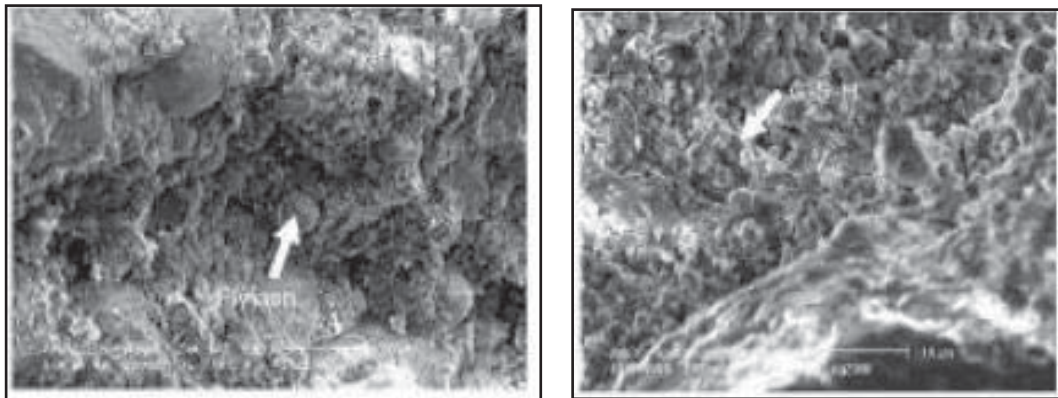


Figura 4 y 5 Formación de portlandita
Obtenido en www.redalyc.org

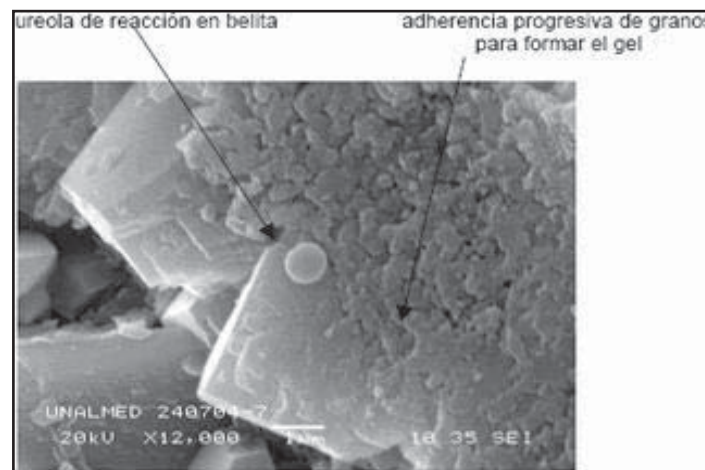


Figura 6 Reacción de Belita
Obtenido en www.redalyc.org

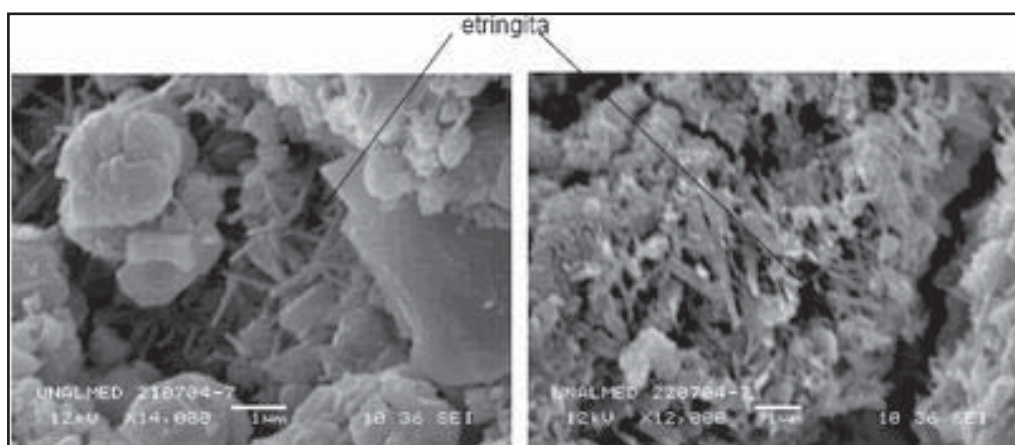


Figura 7 Formación de Etringita
Obtenido en www.materia.coppe.ufrj.br/image

Es importante destacar que la hidratación del cemento no procede a una tasa fija. Tal como puede observarse en el esquema 1, se distinguen 5 etapas en este proceso: ⁽²⁾

- a- Pre inducción : Es una hidratación inicial rápida que ocurre cuando las partículas de cemento son expuestas al agua, liberando una gran cantidad de calor.
- b- Inducción: Hay una reducida hidratación y no se sabe bien la razón.
- c- Aceleración: Se incrementa la tasa de hidratación. Comienza el fragüe
- d- Desaceleración: Disminuye la tasa de hidratación a medida que el material hidratado cubre las partículas.
- e- Difusión limitada: La hidratación y la conglomeración ocurren a muy bajas tasas, ya que las reacciones están limitadas a las tasas de difusión de las especies dentro de la densa red de poros. ⁽²⁾

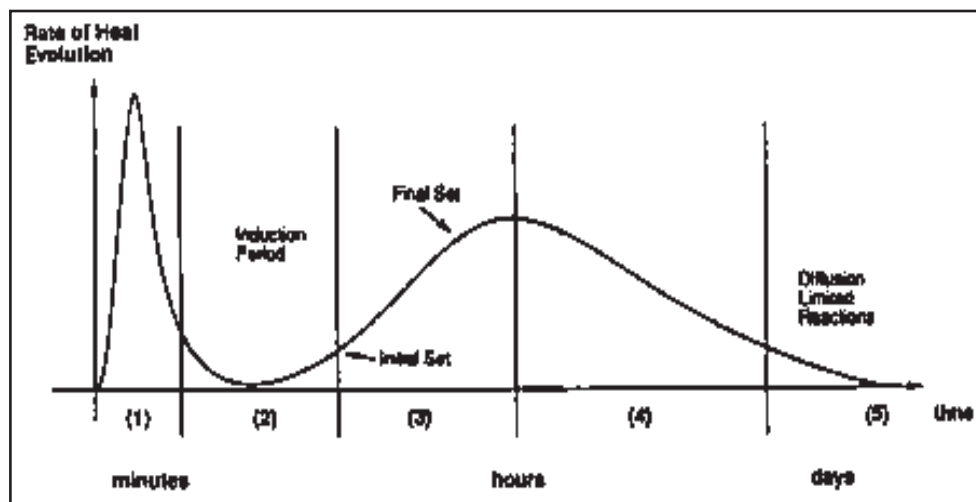


Figura 8: Esquema de etapas en la hidratación del cemento.
Obtenido en www.uprm.edu/Materiales/Microestructuracemento.pdf

Es así que hay varios métodos propuestos para medir el punto de fragüe, por ejemplo midiéndola resistencia a la penetración (la cual comienza a ser diferente de cero luego del set point) o midiendo hasta que punto la mezcla puede seguir siendo bombeada (thickening time). ⁽²⁾

3.2 Dosificación en el concreto hidráulico

Las proporciones en que se mezclan los componentes básicos y complementarios del concreto hidráulico constituyen su dosificación. Las propiedades del concreto endurecido dependen de la dosificación inicial de los componentes básicos y complementarios, del proceso de mezclado, y del proceso de curado. ⁽²⁾

En términos generales los agregados dotan al concreto de una estructura interna en la que los agregados más finos se intercalan entre los agregados más gruesos. ⁽²⁾

La pasta de cemento (cemento más agua), por su parte, llena los espacios libres entre partículas de áridos, y durante el proceso de fraguado genera cristales hidratados que unen químicamente las partículas de agregados. La formación de estos cristales es una reacción química exotérmica (genera calor) que siempre requiere de agua para que tenga lugar, siendo mucho más intensa la reacción (la creación de los cristales cohesivos) en los primeros días posteriores a la fabricación del concreto hidráulico, y luego va disminuyendo progresivamente en su intensidad con el tiempo. Normalmente, dentro del concreto, una parte del cemento no alcanza a combinarse con el agua, por lo que permanece como cemento no hidratado. ⁽²⁾

Para asegurar que las reacciones de fraguado continúen, a partir del endurecimiento inicial del concreto (que normalmente se produce en las primeras doce horas después del mezclado), se requiere dotar continuamente de agua de curado al concreto, la que sirve para reponer el agua de amasado evaporada por el calor emanado como producto de las reacciones químicas. Esta agua de curado usualmente se la proporciona humedeciendo la superficie de los elementos del concreto hidráulico. ⁽²⁾

La propiedad de diseño más importante del concreto constituye su resistencia; la propiedad constructiva más importante es su trabajabilidad. Usualmente estas dos propiedades son mutuamente conflictivas durante la construcción. ⁽²⁾

En general una relación agua/cemento (a/c) baja, medida al peso, que mantenga una adecuada trabajabilidad en el concreto fresco, conduce a concreto hidráulico es de mayor resistencia y mejor calidad. ⁽²⁾

Se requiere aproximadamente una relación a/c mínima de 0.25 para que todo el cemento presente en la mezcla reaccione químicamente con el agua formando pequeños puentes cristalizados entre las superficies de las partículas de áridos. Estos cristales son los responsables de la cohesividad entre las partículas y de la resistencia del concreto en general. ⁽²⁾

Cualquier exceso de agua durante el amasado, por encima de la relación a/c de 0.25, se convertirá, luego del fraguado inicial, en espacios vacíos por la evaporación del agua (o espacios con agua que no alcanza a escapar de los poros luego del fraguado) que disminuyen considerablemente la resistencia del concreto, y también provocará que los puentes cristalizados tengan mayor longitud y sean menos resistentes. ⁽²⁾

Lamentablemente una relación a/c cercana a 0.25 (que en teoría nos proporcionaría la mayor resistencia), no puede ser conseguida en un concreto normal, pues la disminución de agua de amasado provoca una pérdida a

importante de trabajabilidad e inclusive puede llegar a imposibilitar la consecución de una mezcla apropiada. Para asegurar una mezcla homogénea y una trabajabilidad razonable en un concreto normal (sin aditivos) serán necesarias relaciones a/c mínimas del orden de 0.60. ⁽²⁾

La falta de agua de curado durante el fraguado del concreto (particularmente en los primeros días en que las reacciones son más intensas) tiene efectos adversos sobre la resistencia final del concreto, pues provoca que las partículas de cemento no reaccionen totalmente, dando lugar a pocos cristales de unión entre partículas de áridos, con lo que disminuye la cohesión. ⁽²⁾

Hay fundamentalmente dos tipos de reacción. Una en la que los productos de hidratación se forman por nucleación y crecimiento y otra en la que se requiere la colisión de las especies. ⁽²⁾

Tipos de cemento

MATERIAL	TIPO		CLASE* (Nn/mm ²)
CEMENTO	CPO	Cemento Portland Ordinario	20
	CPP	Cemento Portland Puzolánico	30, 30R
	CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40, 40R
	CPC	Cemento Portland Compuesto	
	CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	
	CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	
	CPB	Cemento Portland Blanco	

Tabla 2.1 Tipos de Cemento

Guía del usuario Cemex Concretos

4 MACRO ESTRUCTURA DEL CONCRETO

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. ⁽⁴⁾

Los agregados pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características (modo de fragmentación, tamaño de partícula, origen, composición, forma de partícula y color). ⁽⁴⁾

Agregado Fino (arena)

1) Agregado que pasa la malla 3/8" (9.5 mm) y casi totalmente pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es predominantemente retenido en la malla No. 200 (0.075 mm).

2) Es la porción de un agregado que pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es retenido en la malla No. 200 (0.075 mm). ⁽⁴⁾

Agregado Grueso (grava)

1) Agregado predominantemente retenido en la malla No. 4 (4.75 mm).

2) Es la porción de un agregado retenido en la malla No. 4 (4.75 mm). ⁽⁴⁾

La eliminación de las otras clasificaciones (origen, composición, forma de partícula y color) se debe a que presentan los siguientes inconvenientes:

Clasificaciones creadas con un objetivo diferente a la identificación de agregados para concreto (ejemplo: la división de rocas en ígneas, sedimentarias y metamórficas se realizó de acuerdo con las condiciones naturales de formación de las rocas y no calificando sus características físicas particulares asociables al uso en concreto). ⁽⁴⁾

Conceptos ambiguos (ejemplo: desde el punto de vista de la composición química, basalto y tezontle son lo mismo, aunque es reconocido que pueden tener una diferencia significativa en color y peso volumétrico). ⁽⁴⁾

No califican ninguna característica física de las que se evalúan en los agregados para concreto (ejemplo: origen). ⁽⁴⁾

Miembros de familias diferentes o iguales pueden tener características físicas distintas o similares, generando confusión en las propiedades del material (ejemplo: hay calizas de muy diversa calidad física, desde buena hasta pésima). ⁽⁴⁾

Clasificaciones simplistas que inducen a interpretaciones erróneas (ejemplo: el color). ⁽⁴⁾

4.1 Características físicas y químicas

Las características de los agregados que es conveniente evaluar antes de ser empleados en la fabricación de concreto son:

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

Tabla 3 Las características de los agregados

Guía del usuario Cemex Concretos

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

- Características y requisitos a cumplir de la estructura que se va a fabricar.
- Agregados disponibles en el sitio.
- Composición granulométrica de los agregados a emplear. ⁽⁴⁾

4.1.1 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. ⁽⁴⁾

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. ⁽⁴⁾

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. ⁽⁴⁾

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. ⁽⁴⁾

4.1.2 Limpieza

Tabla 4 Materiales finos indeseables (limo y arcilla) Guía del usuario Cemex

Finos que pasan la malla No. 200	Norma aplicada NMX C-111*	
	Arena (%)	Grava (%)
Finos de cualquier tipo	5.0	2.0
Finos sin arcilla**	10.0	3.0

4.1.2.1 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. ⁽⁴⁾

4.1.2.2 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

Tabla 5 Material que afecta a los agregados

Guía del usuario Cemex Concretos

4.1.2.3 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. ⁽⁴⁾

4.1.2.4 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. ⁽⁴⁾

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

Tabla 6 Porcentaje máximo de grietas en el agregado

Guía del usuario Cemex Concretos

4.2 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. ⁽⁴⁾

4.2.1 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 /cm². Asimismo, es recomendable que para concretos que requieran desarrollar mayores resistencias a las de referencia.

4.2.2 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. ⁽⁴⁾

4.3 Reactividad de los álcalis

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: ⁽⁴⁾

Método de prueba	Carácter del resultado	Evaluación
Estudio petrográfico	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Método químico	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Barras de mortero	Definitivo, estimación potencial	**

Tabla 7. Tipos pruebas para evaluar características en los agregados

4.4 Influencia de los agregados en el concreto

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 friables
Requerimiento de agua	Tamaño máximo/granulometría Sanidad Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Pérdida de revenimiento	Absorción
Segregación	Tamaño máximo/granulometría

Tabla 8 Características de los agregados que influye en las propiedades del concreto en estado fresco

Guía del usuario Cemex Concretos

Estado Endurecido

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Durabilidad	Textura superficial Sanidad Absorción Porosidad Reactividad con los álcalis
Resistencia a compresión	Limpieza Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Resistencia mecánica Partículas friables 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
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Resistencia a la abrasión	Resistencia a la abrasión
Peso unitario	Densidad
Permeabilidad	Porosidad
Partículas friables/terrones de arcilla	Irregularidades superficiales

Tabla 9 Características de los agregados que influye en las propiedades del concreto en estado fresco
Guía del usuario Cemex Concretos

4.5 Uso del 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. Ambas funciones son evaluadas por la Norma NMX C-122, estableciendo los parámetros que deben cumplir las aguas no potables, así como una clasificación de los diversos tipos de agua que existen y sus efectos y limitaciones para ser usadas en concreto. ⁽⁴⁾

Cuando el agua funciona como un ingrediente en la fabricación de concreto, es decir como agua de mezclado, se puede estimar que el agua ocupa entre el 10 y 25 por ciento de cada metro cúbico de concreto que se fabrica. ⁽⁴⁾

Tipo de agua	Efectos con su uso en 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 I.
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 10 CLASIFICACIÓN DEL AGUA(NMX C-122)

Guía del usuario Cemex Concretos

4.5.1 Características físicas y químicas

El agua no potable empleada para el concreto, en cualquiera de las dos funciones anteriormente mencionadas, y dependiendo del cemento que se utilice, puede calificarse de acuerdo a las siguientes características:

Impurezas	Cementos	
	Ricos en Ca	Resistentes a sulfatos
Sólidos en suspensión		
▣ limos y arcillas	2,000	2,000*
▣ finos de cemento y agregados	50,000	35,000*
Cloruros como $\text{Cl}^-(a)$		
▣ concreto con acero de refuerzo	400 (c)	600 (c)*
▣ concreto reforzado en ambientes húmedos	700 (c)	1000 (C)*
Sulfato como $\text{SO}_4^{2-} = (a)$	3000	3500*
Magnesio como $\text{Mg}^{2+} (a)$	100	150*
Carbonatos como CO_3^{2-}	600	600*
Dióxido de carbono disuelto, como CO_2	5	5*
Álcalis totales como Na^+	300	450*
Total de impurezas en solución	3,500	4,000*
Grasas o aceites	0	0*
Materia orgánica	150 (b)	150(b)*
pH	no < 6	no < 6.5

* Límites máximos en ppm.

Tabla 11 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS (NMX C-122)
Guía del usuario Cemex Concretos

- a)** Las aguas que excedan los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesio, podrán emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no excede dichos límites.
- b)** El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX C-88.

- c) Cuando se use cloruro de calcio (CaCl_2) como aditivo acelerante, debe tomarse en cuenta el dosificado para no exceder el límite de cloruros establecido (ACI 318).⁽⁴⁾

En el caso de agua potable, si no se le aprecia olor, color y/o sabor, puede ser utilizada para la fabricación de concreto sin aplicar verificación de calidad alguna. En forma oficiosa, ya que no existe reglamentación alguna al respecto en el área de concreto, puede realizarse alguna revisión de calidad de este tipo de agua, aplicando para ello un análisis de agua potable del tipo que verifica 32 diferentes parámetros.⁽⁴⁾

Material	Tipo		Cumplen con Normas:
Cemento	Tipo	Clase* (Nn/mm^2)	NMX -C-414-ONNCE-1999
	Cemento Portland Ordinario CPO Cemento Portland Puzolánico CPP Cemento Portland Compuesto CPC	20 30, 30 R 40	
Grava	Tamaño máximo del agregado: 20 mm 40 mm Natural: de mina o de río Triturada		NMX C-111 Si el productor propone usar otros materiales, tendrá que proporcionar información en apoyo a su propuesta.
Aditivos	Reductor de agua Normal (Tipo I) o Retardante (Tipo IV)		NMX C-255
Agua	Libre de material nocivo al concreto.		NMX C-155. EN caso de haber sospecha respecto al inciso 6.3, se deberá analizar el líquido de acuerdo con la NMX C-122 y NMX C-283.

Tabla 12 Material para elaborar concreto hidráulico
Guía del usuario Cemex Concretos

La suma de todos estos componentes nos proporciona una mezcla a la que se le denomina concreto hidráulico y estos mismos componentes son los que le dan la resistencia necesaria para poder soportar esfuerzos a compresión, a continuación veremos algunas edificaciones en la que se utiliza el concreto hidráulico y sobre todo su buen comportamiento al ser sometido a esfuerzos por compresión.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) a una edad de 28 días

se le designe con el símbolo $f'c$. Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas especímenes de mortero o de concreto; en los Estados Unidos, a menos de que se especifique de otra manera, los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm. en tanto que los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puente, de edificios y otras estructuras. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 kg/cm cuadrado. Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 420 kg/cm cuadrado. Resistencia de 1,400 kg/cm cuadrado se ha llegado a utilizar en aplicaciones de construcción. La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima como 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión. La resistencia a la torsión para el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y con las dimensiones del elemento de concreto. La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a compresión. La correlación existe entre la resistencia a la compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión, y cortante, de acuerdo a los componentes del concreto y al medio ambiente en que se encuentre. El módulo de elasticidad, denotando por medio del símbolo E , se puede definir como la relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal, E fluctúa entre 140,600 y 422,000 kg/cm cuadrado, y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión. Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación Agua – Cemento y la edad, o el grado a que haya progresado la hidratación. Estos factores también afectan a la resistencia a flexión y a tensión, así como a la adherencia del concreto con el acero. Las relaciones Edad – Resistencia a compresión. Cuando se requiera de valores más precisos para el concreto se deberán desarrollar curvas para los materiales específicos y para las proporciones de mezclado que se utilicen en el trabajo. Para una trabajabilidad y una cantidad de cemento dadas, el concreto con aire incluido necesita menos agua de mezclado que el concreto sin aire incluido. La menor relación Agua – Cemento que es posible lograr en un concreto con aire incluido tiende a compensar las resistencias mínimas inferiores del concreto con aire incluido, particularmente en mezclas con contenidos de cemento pobres e intermedios. ⁽¹³⁾



Figura 9 Estructuras de concreto las cuales estan sometidos a esfuerzos de compresion
(Fotografía de edificios en el Distrito Federal)
Obtenido en www.agoraphoria.com/index.



Figura 10 Estructura de concreto sometida a esfuerzos de compresion, **punte formado por tres claros de 30.0 mts., para un ancho de 8.80 mts**
(puente ubicado en Chihuahua)
Obtenido en www.chihuahua.gob.mx/scop/Contenido/plantilla...

5. CAUSAS Y AGENTES DE DETERIORO Y FALLA EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO Y CONCRETO REFORZADO

5.1 Principales formas y causas de deterioro del concreto

El deterioro del concreto puede adoptar varias formas, dependiendo de diversos factores tales como las causas que lo originan, la intensidad y duración de las acciones, las características geométricas, funcionales y de refuerzo de las estructuras, la composición y las condiciones de exposición de servicio, la calidad de la construcción, etcétera. ⁽³⁾

Sin embargo, hay deterioros cuya frecuencia e importancia suelen ser mayores, por lo que existen procedimientos de uso como para repararlos. En el curso de este capítulo, se describe especialmente la manera como pueden corregirse los defectos y deterioros del concreto más comunes. En la de los tipos de deterioro considerados a continuación veremos un resumen de las causas y formas de manifestarse. ⁽³⁾

A continuación veremos algunas causas de deterioro en el concreto hidráulico.

5.2 Erosiones

La erosión del concreto, que es uno de los deterioros más frecuentes, se manifiesta por la pérdida de una capa superficial de configuración, espesor y extensión variables. Las acciones más comunes que pueden causarla son: ⁽³⁾

5.2.1 Por abrasión mecánica

Desgaste superficial de pisos, losas y pavimentos de concreto en zonas expuestas a tráfico intenso de vehículos o equipo y/o en áreas de maniobras y trabajo pesado. El desgaste puede manifestarse desigual en una misma estructura, según cambios en la calidad del concreto y en la intensidad de uso. ⁽³⁾



Figura 11 Erosión en el concreto expuesto al tráfico vehicular

www.starseal.com/macrodeck.htm

5.2.2 por abrasión hidráulica

Desgaste generalizado en la superficie de concreto de estructuras que prestan servicio en contacto con flujo de agua que arrastra sólidos. Pueden manifestarse zonas en que el desgaste es mayor por el efecto de los grandes fragmentos arrastrados por el agua (como sucede en el fondo de los túneles) o por deficiencias en la calidad del concreto en lugares específicos. ⁽³⁾

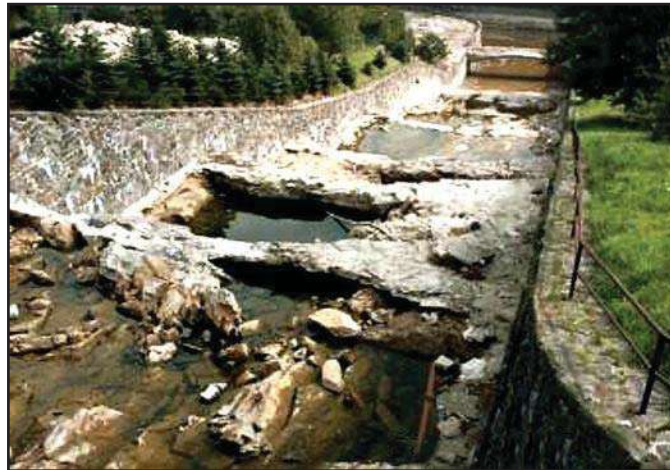


Figura 12 Estructura hidráulica erosionada por el paso constante del flujo

Obtenida en www.vaw.ethz.ch/research/fluid/abrasion/wb

5.2.3 Por cavitación

Daños de diversa magnitud en estructuras de concreto expuestas al flujo de agua con muy alta velocidad. El daño se origina por el colapso (implosión) de las burbujas de vapor ocasionado por los cambios de presión y de velocidad del flujo de agua. Una vez iniciado, el daño puede avanzar con gran rapidez hasta afectar todo el espesor del concreto en grandes zonas; si no se suspende el flujo o se modifica su régimen para anular el fenómeno. ⁽³⁾

5.2.4 Por ataque químico

Erosión inicial poco profunda en la superficie de estructuras de concreto en contacto con sustancias químicas agresivas. La extensión del daño varía de acuerdo con la agresividad de la sustancia, pero se manifiesta la tendencia al deterioro progresivo de todo el espesor del concreto si persiste el ataque, por la desintegración paulatina de la matriz cementante. El ataque químico de los sulfatos del suelo o del agua sobre las estructuras de concreto se manifiesta de manera diferente, pues se forma un compuesto expansivo. ⁽³⁾

Dentro del concreto (sulfoaluminato de calcio que comienza por agrietarlo y puede terminar también por desintegrarlo por completo. ⁽³⁾



Figura 13 Estructura erosionada por el contacto con elementos químicos
Obtenida en www.ies.wisc.edu/research

5.2.5 Por impacto y frotamiento

Erosión localizada del concreto en lugares específicos de estructuras que reciben frecuentemente el efecto combinado del impacto y el frotamiento, como suele ocurrir en puentes vehiculares y atracaderos de embarcaciones. ⁽³⁾

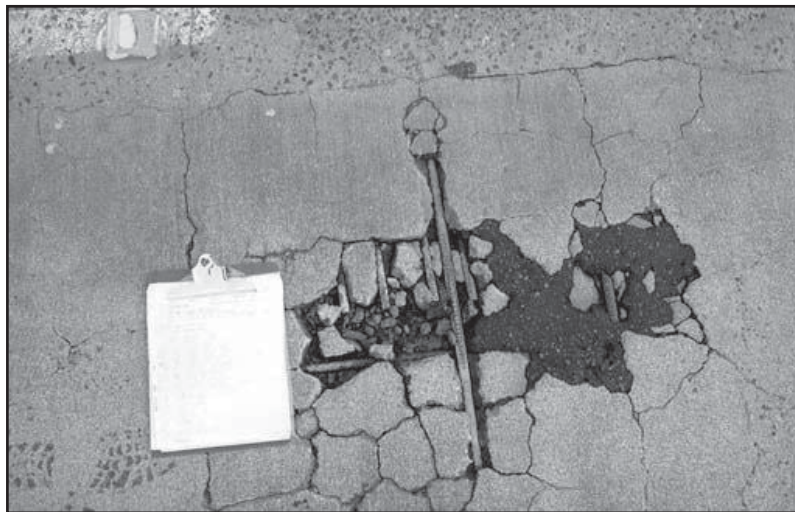


Figura 14 Erosión por impacto y frotamiento

www.starseal.com/macrodock.htm

5.3 Agrietamientos

Los agrietamientos del concreto son roturas que se producen debidos a que se generan esfuerzos (generalmente de tensión) superiores a los que el concreto puede resistir. De acuerdo con sus efectos, los agrietamientos se dividen en dos grandes grupos que son los estructurales y los no estructurales. ⁽³⁾

5.3.1 Estructurales

En este grupo de agrietamientos, la generación de los esfuerzos causantes se atribuye a factores ajenos al concreto que actúan sobre la estructura, es decir, cargas, sollicitaciones y fallas de diversa índole y origen, por ejemplo: ⁽³⁾

- Movimientos diferenciales de la estructura por asentamientos o hundimientos en el terreno.
- Sobrecargas permanentes (uso indebido de la estructura) o eventuales (sismo, etc.)
- Acero de refuerzo insuficiente (nulo, deficiente o mal colocado).
- Falla de remoción prematura de la cimbra
- Diseño estructural inadecuado (indefinición de juntas, etc.). ⁽³⁾

Los agrietamientos de este grupo no siguen una tendencia determinada en su manifestación, por la diversidad de condiciones y situaciones en que pueden ocurrir y por la variada naturaleza y combinación de los esfuerzos implicados (tensión, compresión, flexión y cortante). No obstante, en cada caso particular es posible establecer las causas probables de los agrietamientos, por el tiempo y las circunstancias en que se producen y por la forma, posición y dirección que adoptan las trayectorias de las grietas, así como por su abertura y profundidad. ⁽³⁾

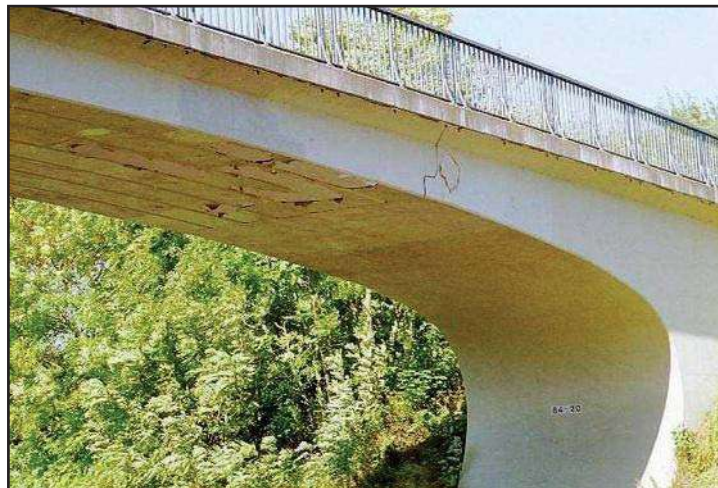


Figura 15 Fisura en puente que pudo ser ocasionada por varios factores como un mal procedimiento constructivo, mal cálculo, tipo de material inadecuado

www.starseal.com/macrodock.htm

5.3.2 No Estructurales

Estos agrietamientos son atribuibles a esfuerzos que se producen como consecuencia del comportamiento intrínseco del concreto, independientemente de las cargas y solicitaciones que actúan sobre la estructura. Se distinguen dos clases de agrietamientos no estructurales, según que el concreto se halle en estado plástico (de fraguado) o endurecido. ⁽³⁾

5.3.3 Del concreto en estado plástico (de fraguado)

Los agrietamientos del concreto plástico ocurren pocas horas después de la terminación del colado, ya sea antes, en el curo o inmediatamente después del fraguado. Hay dos tipos básicos; los que se producen por asentamiento y sangrado del concreto recién colocado y los que ocurren por contracción. Propicia los primeros, el uso de mezclas de concreto demasiado fluidas y los segundos, cuando pierde rápidamente por evaporación el agua superficial, estos son más frecuentes en elementos como losas, firmes, pisos que tienen gran superficie expuesta. ⁽³⁾

La característica común de estos agrietamientos es que son muy notorios por su gran abertura en la superficie del concreto, abertura que, sin embargo, disminuye rápidamente con la profundidad, no afectando normalmente todo el espesor del concreto. La trayectoria de las grietas no sigue una tendencia definida, pues depende de las restricciones que en cada caso están para que el concreto plástico se asiente o se contraiga. Sin embargo, muchas veces las grietas por asentamientos tienden a coincidir con la posición de las varillas de refuerzo cercanas a la superficie, y las grietas de contracción plástica adoptan el patrón en forma de “mapa” o de “pata de cuervo”. ⁽³⁾



Figura 16 Aparición de grieta en el concreto con poco tiempo de fraguado

Obtenido en www.inspect-ny.com/structure/foundation.htm

5.3.4 Del concreto en estado endurecido

El concreto endurecido puede experimentar en su vida de servicio múltiples agrietamientos de carácter no estructural, que casi siempre se deben a elevados esfuerzos de tensión que rebasan la capacidad del concreto para resistirlos. Entre las causas más frecuentes de este tipo de agrietamientos destacan los cambios volumétricos, cuyas principales modalidades son: ⁽³⁾

a) Por cambios de temperatura

Cuando el concreto se calienta aumenta de volumen y conforme se enfría tiende a recuperar su volumen original. Si la estructura no tiene restricciones para cambiar de volumen, no se generan esfuerzos en el concreto; sin embargo, esto casi nunca sucede, por lo que durante el enfriamiento y la contracción consecuente tienden a producirse esfuerzos de tensión que, al exceder la resistencia del concreto, lo agrietan. Una fuente normal de calor es la que corresponde a la hidratación del cemento; sin embargo, sus efectos sólo son importantes en estructuras voluminosas o de gran espesor, en las que el calor generado no se disipa al ambiente con rapidez y sobre eleva la temperatura de la estructura. Entre las medidas que se adoptan para prevenir los efectos de estos cambios volumétricos están la ejecución de juntas de contracción en la estructura, el armado expreso y el empleo de hielo como parte del agua de mezclado. ⁽³⁾

Las grietas de contracción térmica pueden atravesar todo el espesor del concreto cuando el elemento es delgado. Si bien no suele afectar el comportamiento correctivo es necesario por requisitos de durabilidad, particularmente en estructuras que prestan servicio en contacto con el agua o con un medio húmedo. La edad del concreto en que estas grietas se manifiestan puede ser variable, pues depende del tiempo de tarde la estructura en enfriarse; sin embargo, en estructuras ordinarias (no voluminosas) su manifestación suele ocurrir entre una y dos semanas después de colado, lo que es una característica que las distingue de las que produce la contracción por secado que se menciona enseguida, ya que estas últimas surgen en un plazo mayor. ⁽³⁾

b) Por pérdida de humedad

El concreto recién mezclado posee un contenido unitario de agua que depende tanto de las características de los agregados y del cemento como de la fluidez de la mezcla, entre otros factores. Parte de esta agua se combina con el cemento y el resto permanece como agua libre que tiende a evaporarse con el tiempo. En forma paralela, con esta pérdida de agua, el concreto se contrae, dando lugar a la llamada contracción por secado que es causa frecuente de agrietamientos en el concreto, principalmente en elementos como losas y pisos que presentan una gran superficie de evaporación. ⁽³⁾

Los factores que influyen en el tiempo que tardan en manifestarse los agrietamientos producidos por la contracción por secado son: las características geométricas de la estructura, la eficiencia del curado y las condiciones ambientales; sin embargo, salvo en casos de intenso secado inicial, sus primeros síntomas aparecen al cabo de tres o cuatro semanas después del colado. La forma y posición adoptan estas grietas pueden variar de acuerdo con las resistencias que tenga la estructura para contraerse, incluyendo sus condiciones de refuerzo. No obstante, en elementos alargados, estas grietas se manifiestan sensiblemente normales al eje longitudinal, con separaciones del mismo orden. Como en el caso de las grietas por contracción térmica, las de contracción por secado suelen afectar todo el espesor del concreto en elementos delgados, y su reparación debe hacerse en beneficio de la durabilidad de la estructura, tratándolas como grietas activas.⁽³⁾

Otra manifestación de la contracción por secado es el agrietamiento superficial del concreto con grietas menudas que adoptan formas hexagonales o en forma de “mapa”, que se conocen como “estrellamiento” (en inglés cracking). Estas grietas ligeras normalmente aparecen en las superficies coladas contra el apoyo de cimbra no absorbente (metálica o de plástico laminado) y también en la superficie de losas que reciben acabado pulido con llana metálica; se las relaciona con la contracción diferencial que experimenta la costra superficial de mortero, rica en cemento. La profundidad de estas fisuras es muy reducida y su tratamiento más bien se hace con fines estéticos, aplicando al concreto un recubrimiento que posea suficiente elasticidad para cubrirlas y “puentearlas”⁽³⁾

C) Por corrosión del refuerzo

El concreto endurecido es un medio alcalino ($\text{pH} = 12$) que suministra protección al acero de refuerzo contra la acción oxidante del oxígeno del aire y la penetración de sales que, como los cloruros, propician la corrosión electrolítica. Sin embargo, hay ocasiones en que esta protección no es suficiente porque:

- El concreto es demasiado permeable.
- Existen agrietamientos en la estructura
- El espesor del recubrimiento de concreto es reducido
- Están expuestos a un medio de contacto muy corrosivo
- Existen juntas de construcción defectuosas.⁽¹⁾

Existen además el fenómeno de carbonatación producido por la reacción entre el bióxido de carbono de la atmósfera y el hidróxido de calcio del concreto, que disminuye la alcalinidad del concreto y su capacidad para proteger el acero de refuerzo. Por todo ello, en presencia de una o varias de estas causas, el acero de refuerzo puede sufrir corrosión dando lugar a la formación de productos cuyo aumento de volumen agrieta el concreto y lo descascara, poniendo el

descubrimiento las varillas de refuerzo y dejándolas expuestas a sufrir mayor corrosión. Es decir, se trata de un deterioro progresivo que se auto alimenta. ⁽¹⁾ El proceso de corrosión del acero de refuerzo tiene dos etapas: una pasiva que puede durar varios años, en que la corrosión no es visible, aunque se halla en estado latente, y otra activa, en la que la corrosión se hace evidente, y avanza con rapidez. Lo deseable es descubrir la corrosión en su etapa latente, a fin de que el tratamiento correctivo resulte eficaz. Un síntoma usual de corrosión incipiente, que precede a la formación de agrietamientos, es la aparición de leves manchas de óxido en la superficie del concreto o de ligeros abultamientos. ⁽¹⁾

Esquema

Las fases de degradación del concreto armado:
Acero.

Frente de ataque

El concreto armado es joven y estable pero comienza la penetración del CO₂ y del oxígeno. ⁽¹⁾

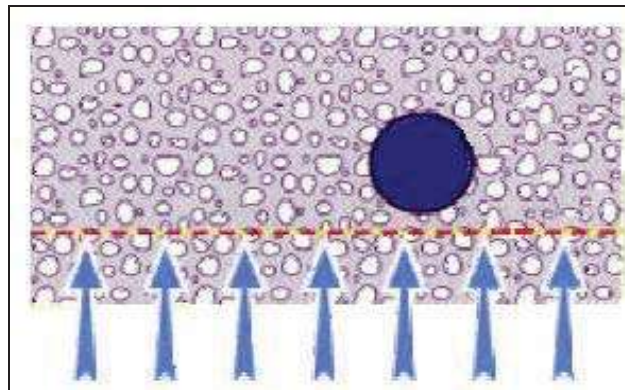


Figura 17 La carbonatación avanza en dirección del acero que pronto se hará pasivo.
Obtenido en www.zonacentro.net/productos/construccion/patologias/pdf/Patologia14.pdf -

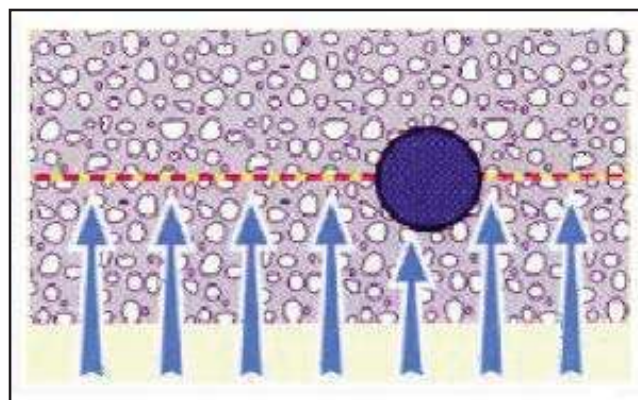


Figura 18 La corrosión comienza (en presencia de humedad) Se produce la primera fisuración
Obtenido en www.zonacentro.net/productos/construccion/patologias/pdf/Patologia14.pdf -

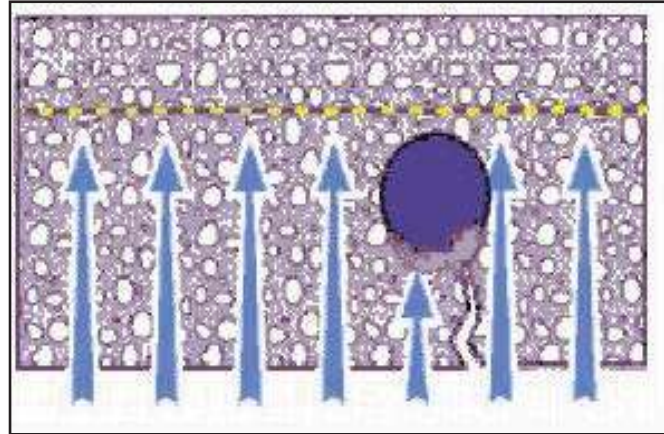


Figura 19 Fase final. Oxidación importante del acero con formación de sales expansivas. Fragmentación y manchas de óxido.
Obtenido en www.zonacentro.net/productos/construccion/patologias/pdf/Patologia14.pdf -

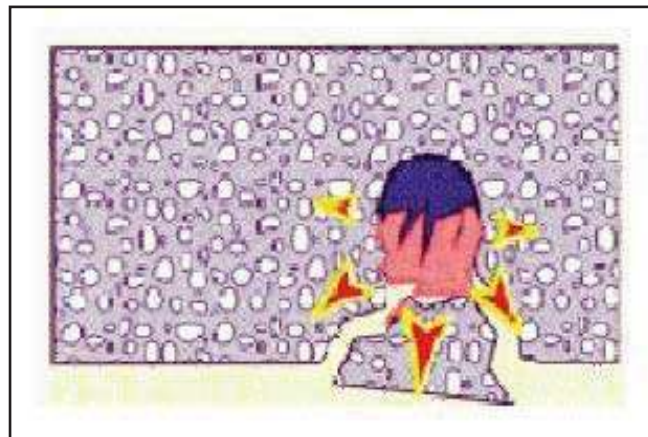


Figura 20 Fractura en la estructura
Obtenido en www.zonacentro.net/productos/construccion/patologias/pdf/Patologia14.pdf -

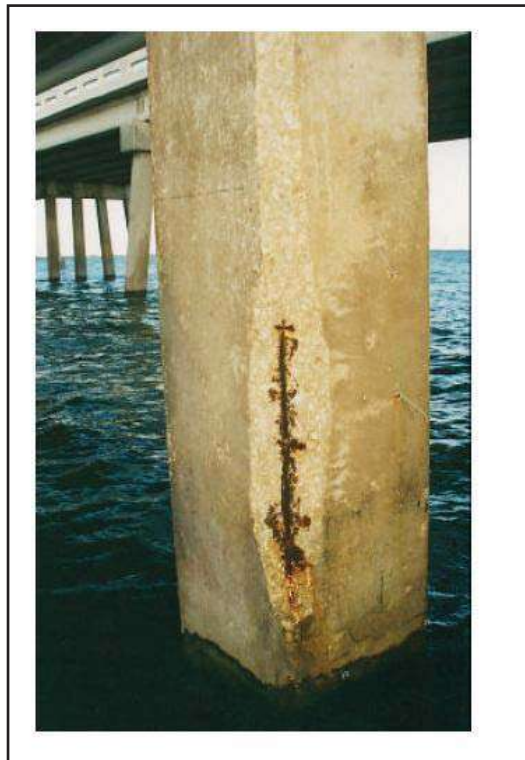


Figura 21 Fotografía de la subestructura de un puente expuesto a un ambiente marino que se encuentra en su etapa de vida remanente.

Obtenido en [/www.imt.mx](http://www.imt.mx)

Este tipo de daños bastantes frecuentes ponen en peligro la solidez de los elementos afectados y necesitan a menudo reparaciones costosas por la repetición de un gran número de elementos idénticos (fachadas, cornisas...).⁽¹⁾

Destacar la necesidad de una correcta y clara definición del armado en la documentación gráfica y control de la ejecución, aunque hemos de apuntar la existencia de revestimientos o pinturas aptas para proteger las fachadas de ambientes húmedos.⁽¹⁾

d) Por reacciones entre el cemento y los agregados

Existen ciertas reacciones químicas entre el cemento Portland y los agregados que pueden agrietar progresivamente el concreto, hasta llegar a inhabilitarlo completamente. En dichas reacciones están involucrados los álcalis del cemento (óxido de sodio y de potasio) y algunas rocas y minerales que suelen estar presentes en los agregados (gravas y arenas) que se utilizan para elaborar concreto. Hay dos tipos de reacciones de esta índole: la reacción álcali-sílice en la que están comprometidas diversas formas de sílice reactiva (Amorfa, cripto-cristalina y aún cristalina intensamente deformada), y la llamada reacción álcali-carbonato, en la que intervienen rocas calizas como las dolomíticas.⁽³⁾

Para que estas reacciones se desarrollen y causen daño al concreto, es necesaria la concurrencia simultánea de tres condiciones:

- Cemento Portland con alto contenido de álcalis (más de 0.60% como Na_2O).
- Agregados con rocas y minerales reactivos.
- Concretos permanentemente húmedo o con ciclos de humedecimiento y secado.⁽³⁾

De estas condiciones, sólo la tercera puede ser objeto de maniobra después de construida la estructura. De tal manera que, si en la elaboración del concreto se emplearon cemento con alto contenido de álcalis y agregados con rocas y minerales reactivos, existirá el riesgo potencial de que se produzca la reacción si hay suficiente humedad en el interior del concreto. Consecuentemente, un medio para inhibir la reacción en estos casos consiste en impedir el acceso de humedad al concreto, aplicando a la estructura un recubrimiento apropiado. La decisión de hacerlo debe tomarse con prontitud, antes de que se manifiesten síntomas de la reacción, con base en los antecedentes de los materiales empleados en la obra, ya que dicha reacción es irreversible y una vez iniciada no existen medios para detenerla.⁽³⁾

La reacción álcali-agregado produce un gel que se hincha en presencia de humedad, provocando presiones internas en el concreto que lo agrietan hasta afectar su integridad estructural. Estas grietas no siempre tienen un patrón definido, pues dependen de las condiciones restrictivas que existan en la estructura. Por ejemplo, en columnas las grietas pueden ser verticales debido a su poca restricción lateral; en otros elementos, como muro y trabes, pueden presentar una tendencia horizontal e, incluso, en ciertos casos, adoptan la forma irregular de “pata de cuervo” que la expansión produce un agrietamiento en forma de “ampa”.⁽³⁾

Esta circunstancia hace que la presencia de esta reacción no siempre pueda identificarse con facilidad, pues sus manifestaciones se confunden con las de otros fenómenos que también producen agrietamientos. El medio de identificación, tal vez, más efectivo, es someter a examen petrográfico muestra de concreto extraídas de la estructura, en los sitios específicos donde hay agrietamientos.⁽³⁾

No existe una versión única en cuanto al tiempo que tarda en manifestarse esta reacción, pues depende de muchos aspectos peculiares de cada obra en particular. Sin embargo, la opinión más generalizada es que se requieren varios años para que se produzcan los primeros síntomas de agrietamientos.⁽³⁾

5.4. Daños por fuego

En el caso de una estructura afectada por incendio, en que la causa del deterioro es obvia, lo importante es definir los efectos que las altas temperaturas pudieron producir en el concreto, a fin de que el tratamiento correctivo resulte eficaz. Los daños que el fuego produce en el concreto dependen del tiempo que dure el incendio y de las temperaturas que alcance. Para medir la resistencia del concreto al fuego, se realizan pruebas sometiendo a un gradiente térmico que simula las condiciones de un incendio promedio o "incendio estándar". Según éste, la temperatura asciende a 538 °C en 5 minutos, a 704 °C en 10 minutos, a 843°C, en 30 minutos, a 927°C en 1 hora y a 1093 °C en 4 horas. Bajo tales condiciones de pruebas, se ha observado que: ⁽⁵⁾

A mayor temperatura, mayor pérdida de resistencia en el concreto. Para temperaturas inferiores a 300° C, la pérdida es poco significativa; sin embargo, la resistencia es menor en concretos con agregados calizos que con agregados silíceos ligeros. ⁽⁵⁾

El contenido de humedad retrasa la elevación de temperatura a través del concreto. Si hay restricción para la expansión térmica del concreto, la capacidad de carga de la estructura aumenta al calentarse. ⁽⁵⁾

La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo comienza a disminuir desde los 300 °C, reduciéndose a cerca de la mitad a 600 °C. Al aumentar el espesor del recubrimiento de concreto, se reduce la velocidad con que se calienta el acero de refuerzo, mejorando así su resistencia al fuego. ⁽⁵⁾

En particular es conveniente hacer pruebas a muestras de concreto extraídas de la estructura, siendo tal vez el ensayo de resistencia a compresión y el examen petrográfico, los medios de mayor utilidad para emitir juicios. ⁽⁵⁾

La manifestación del deterioro puede ser apreciables en ocasiones, al observarse la superficie del concreto carbonizada y con desprendimientos, pero en otras no resulta tan evidente, sin embargo, al transcurrir el tiempo, comienzan a notarse daños que al principio pasaron inadvertidos. Por tal motivo, es deseable realizar este tipo de pruebas con objeto de conocer las propiedades reales del concreto. ⁽⁵⁾



Figura 22. Esquema en el cual se muestran las fases del daño en el concreto producidos por fuego

www.bomberojez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -

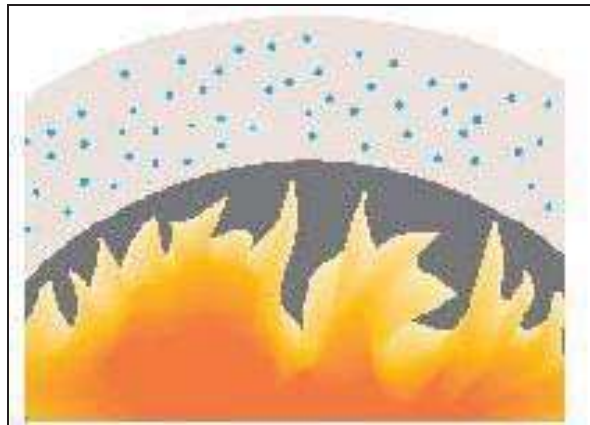


Figura 23. El vapor de agua es componente estable e integral del concreto hidráulico, con carácter previo a su calentamiento.

Obtenido en www.bomberojez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -

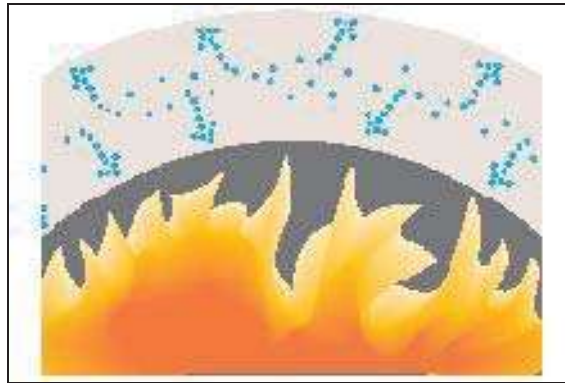


Figura 24. Comienza la migración de vapor de agua a través de capilares a medida que se calienta el concreto hidráulico.

Obtenido en www.bomberojerez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -

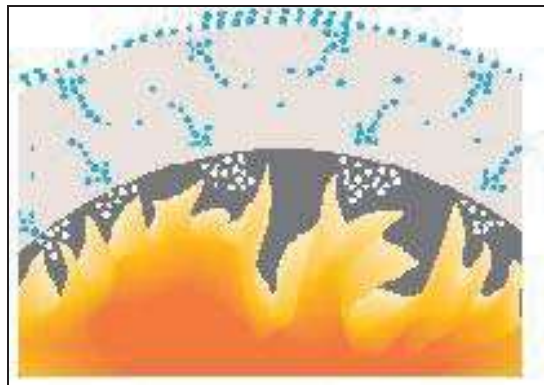


Figura 25. El vapor de agua emerge como vapor en la parte caliente, y como agua líquida en la parte fría, a medida que aumenta la temperatura en el concreto hidráulico.

Obtenido en www.bomberojerez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -

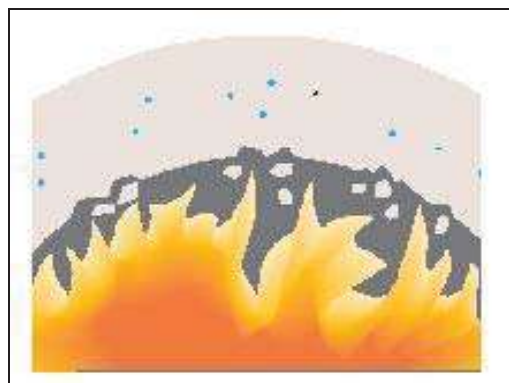


Figura 26. Comienza el desgajamiento a medida que el concreto se deseca localmente

Obtenido en www.bomberojerez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -



Figura 27. Daño por fuego producido en estructura de concreto armado
Obtenido en www.bomberojez.com/accesor/descar/patologia48.pdf -

5.5. Manchas en el concreto

En el caso de las manchas en el concreto es necesario en primer término, definir el origen de la mancha para poder estimar su posible efecto deteriorante y, de ahí, establecer el tratamiento correctivo apropiado. ⁽³⁾

Hay muchas sustancias que pueden manchar el concreto, algunas son inocuas, de manera que el tratamiento puede hacerse sólo con fines estéticos. Hay otras que pueden ser el indicio de otro deterioro más importante, como sucede con las manchas de óxido que aparecen como primeros síntomas de corrosión en el acero de refuerzo, en cuyo caso es necesario que el tratamiento correctivo rehaga más a fondo, con el fin de eliminar la causa. ³ Finalmente, hay sustancias que además de manchar el concreto le producen deterioro de diversa magnitud y rapidez, por eso es indispensable proceder cuanto antes a su eliminación para evitar que progrese el deterioro, removiendo todo el concreto manchado. ⁽³⁾

5.6 Otros deterioros

Las superficies de concreto que no tienen suficiente dureza pueden manifestar desprendimiento de polvo por las fricciones que soportan, como sucede en los pisos, o por el simple efecto de los agentes atmosféricos, como a veces se manifiesta en muros exteriores. Esta forma de deterioro se relaciona con una deficiente calidad o debilidad del concreto, cuyas causas más frecuentes provienen de la etapa constructora, y son :

- Empleo de mezclas de concreto con demasiado contenido de agua (muy fluidas) y que sangran en exceso después de su colocación.
- Ejecución de un acabado inadecuado en la superficie libre del concreto, ya sea por realizarse prematuramente o con excesiva manipulación.
- Uso de agregados con demasiado polvo y/o materia orgánica.
- Falta de aplicación de un buen curado al concreto desde sus primeras edades. ⁽³⁾

Es conveniente corregir el empolvamiento del concreto desde que comienza a manifestarse, porque de lo contrario puede resultar en un deterioro mayor. En el caso de pisos, puede requerirse la colocación de una capa resistente al desgaste, y en el de muros, puede bastar con un recubrimiento decorativo. ⁽³⁾

5.6.1 Calavero

Con este término se designa la aparición de pequeñas cavidades en la superficie del concreto, causadas por el rompimiento y desintegración de partículas de grava cercanas a la misma. Este tipo de deterioro suele ser propiciado por la deficiente calidad de la grava y por la severidad de las condiciones de exposición y servicio, como las que corresponden a los ciclos de congelación y deshielo. Salvo en aquellos casos en que la calidad de la grava fuera francamente defectuosa, esta forma de deterioro no debería presentarse con frecuencia en las condiciones ambientales que normalmente prevalecen en la mayor parte del país. ⁽³⁾

5.6.2 Lixiviación por cal

El fenómeno de lixiviación o precitación se produce cuando un líquido, al penetrar en un sólido, disuelve y extrae las sustancias solubles que contiene. En el caso del concreto, puede ocurrir la lixiviación cuando éste tiene contacto con agua capaz de penetrar y disolver el hidróxido de calcio que se encuentra en su interior, el cual es un compuesto altamente soluble que se forma como consecuencia de la hidratación de cemento Portland. ⁽³⁾

El mecanismo de lixiviación en el concreto tiende a incrementar su porosidad y a hacerlo durable, es decir, lo deteriora prematuramente. Sus efectos se intensifican si el concreto es muy permeable y/o si el agua tiene alto poder disolvente, como sucede con las aguas muy puras que tienen bajo poder disolvente, como sucede con las aguas muy puras que tienen bajo contenido de sales disueltas. Este tipo de deterioro es más frecuente en la proximidad de filtraciones de agua a presión. ⁽³⁾

5.6.3 Eflorescencias

Las eflorescencias, que son sales depositadas en la superficie del concreto, con frecuencia se consideran un inconveniente estético, pero también pueden ser la manifestación de un deterioro más importante. En forma parecida al fenómeno de la lixiviación, las eflorescencias son propiciadas por el agua que se desplaza a través del concreto, ya sea por presión hidrostática o por absorción capilar. Esta agua, después de atravesar el concreto, llega a la superficie expuestas al ambiente y se evapora depositando las sales disueltas que contiene, que al perder su agua de cristalización adquieren un aspecto polvo.

Algunas de las sales disueltas en el agua fueron adquiridas por ésta antes de entrar en contacto con el concreto, otras pudieron ser extraídas del concreto por lixiviación. Debido a ello, las eflorescencias deben verse como una forma de deterioro incipiente, cuya causa debe tratar de suprimirse. ⁽³⁾

5.6.4 Defectos de construcción

Hay ocasiones en que una estructura de concreto puede padecer agrietamientos no estructurales por deficiencias cometidas en su construcción o malas prácticas seguidas durante la misma. Entre los casos más frecuente pueden citarse:

- Empleo de concretos con diferente composición y propiedades en una misma estructura.
- Utilización de mezclas de concreto con mayor contenido de agua del necesario.
- Deficiente continuidad y homogeneidad del concreto por mala colocación y compactación.
- Imprevisiones y deficiencias en el cálculo, construcción y remoción de las cimbras.
- Falta de cuadro adecuado, de acuerdo con las características de la estructura y del ambiente. ⁽³⁾

El ambiente de composición en una mezcla de concreto produce inevitablemente un cambio de propiedades, cuya importancia, en algunas cosas, puede ser significativa. Por ejemplo, cuando se cambia la clase de cemento o el origen de los agregados, puede cambiar también las contracciones de origen térmico o por secado en el concreto endurecido. Consecuentemente, si se produce el cambio de concreto en colados contiguos de una misma estructura, es posible que se manifieste una grieta de dicha zona, causada por diferencias en las contracciones de ambos concretos. ⁽³⁾

Existe una relación directa entre el contenido unitario de agua de la mezcla en el concreto fresco y su posterior contracción por secado en estado endurecido. En estructuras donde esta contracción desempeña un papel importante, como en losas, pisos y revestimiento de canales, por ejemplo, es necesario definir la separación de las juntas de contracción con base en la contracción por secado estimada para el concreto que se usará. Si como consecuencia del empleo de mezclas con exceso de agua (demasiado fluidas), se incrementa la contracción por secado del concreto, las juntas pueden resultar demasiado distantes entre sí y la estructura puede agrietarse en sitios intermedios. ⁽³⁾

La colocación y compactación del concreto durante el colado, debe hacerse en forma continua para obtener homogeneidad y compacidad en la estructura. Si se ocurre una interrupción en el colado y se produce una junta fría que no se trata debidamente, se origina una discontinuidad en la estructura que

posteriormente pueda originar un agrietamiento en ese sitio. ⁽³⁾

Las cimbras se calculan tomando en cuenta el peso volumétrico del concreto y el empuje horizontal que éste produce al compactarse con un fluido en la etapa anterior al fraguado, considerando que el fraguado se presenta al cabo de unas cuantas horas y deja de producir ese empuje. Sin embargo, cuando se trata de hacer un colado vertical de gran altura y se utiliza un aditivo retardante del fraguado, es posible que el empuje del concreto en la base de la cimbra exceda lo previsto y provoque su desplazamiento. Esto, que comúnmente se conoce como una botadura de cimbra, puede causar agrietamientos en el seno del concreto, los que pueden pasar inadvertidos. ⁽³⁾

La pérdida prematura de agua, en el concreto recién colocado, incrementa su contracción plástica y es causa frecuente de agrietamientos en losas, pisos y estructuras que tienen gran superficie expuesta al medio ambiente. ⁽³⁾

El procedimiento indicado para prevenirlo consiste en aplicar un sistema de protección y curado eficiente y oportuno. A falta de aplicación de esta medida pueden atribuirse muchos de los agrietamientos que el concreto manifiesta en estado plástico. ⁽³⁾

Otros defectos de concreto, en la etapa constructiva, pueden ocasionar deterioros prematuros de las estructuras en servicio. Estos deterioros responden a un gran número de causas y condiciones entre las que pueden citarse:

Concreto alveolado, en que por falta de mortero se aprecian expuestas las partículas del agregado grueso. Este tipo de efecto puede tener diversos orígenes: mezcla de concreto excedía de grava o demasiado seca; segregación de la mezcla durante la colocación en el espacio cimbrado; tamaño de grava demasiado grande para el espesor y la separación del refuerzo en la estructura; compactación deficiente de la mezcla de concreto por falta de equipo adecuado; cimbra defectuosamente punteada por permita la fuga de lechada. ⁽³⁾

Agujeros en el concreto dejados por alambres utilizados para fijar la cimbra. Normalmente se trata de agujeros geoméricamente regulares y de pequeño diámetro. ⁽³⁾

Concreto superficialmente blando, causado por el exceso de agentes para despegar las cimbras, como aceites, grasas y otros. Este defecto puede solucionarse mediante el endurecimiento superficial del concreto. ⁽³⁾

Incumplimiento en los acabados especificados y/o en las tolerancias geométricas establecidas. Este defecto constructivo resulta particularmente decisivo en el comportamiento de las estructuras de concreto de las obras hidráulicas, sobre todo en aquellas que deben prestar servicio en contacto con flujo de agua de alta velocidad. ⁽³⁾

6. TIPOS DE FALLAS Y METODOS DE ANÁLISIS

6.1 CLASIFICACIÓN DE GRIETAS POR SU ACTIVIDAD

Independientemente de su orden, las grietas también pueden clasificarse en dos tipos: las activas o “grietas vivas” y las inactivas o “grietas durmientes”. Las grietas activas son las que experimentan cambios con el tiempo, en cuanto a número, abertura y longitud de desarrollo. Por el contrario, las inactivas se manifiestan invariables en esos aspectos en el curso del tiempo. ⁽³⁾

Como se verá más adelante, esta diferencia es importante porque determina el procedimiento y el material que en cada caso conviene utilizar para repararlas. ⁽³⁾

Para definir si una grieta es activa o inactiva, es necesario verificar si tiene movimiento mediante la colocación de “testigos”. ⁽³⁾

Un procedimiento sencillo consiste en pegar con resina epóxica una placa de vidrio sobre la grieta, utilizando plastilina para mantener la placa en su lugar. También endurece el pegamento una lechada pobre de cemento, formando una pequeña placa sobre la grieta. Es recomendable registrar en el testigo la fecha de su colocación, para los casos en que se realiza un seguimiento en el tiempo de actividad de la grieta. ⁽³⁾

6.2 Clasificación de grietas por su abertura

La importancia de las grietas normalmente se juzga en función de la influencia que pueden ejercer sobre la seguridad, funcionalidad y durabilidad de las estructuras de concreto, como consecuencia de la afectación de propiedades tales como su resistencia mecánica y su impermeabilidad o por construir vías de acceso de refuerzo, la lixiviación de sales y otros agentes agresivos. Existen además los aspectos emotivos y estéticos, que algunas veces ejercen también gran influencia en la calificación de los agrietamientos y en la urgencia con que deben repararse. ⁽³⁾

Para estimar el grado de afectación que las grietas pueden producir en esos aspectos, es frecuente hacer referencia a su abertura superficial. Aun cuando ésta no siempre es representativa de la abertura interna (la cual pueden ser menor o mayor, según en caso) tiene la ventaja de poder medirse con relativa facilidad y servir como medio de comparación en casos semejantes. Las grietas comienzan a verse a simple vista cuando su abertura excede de 0.1 mm aproximadamente, y pueden alcanzar aberturas del orden de 1 cm, o incluso mayores, para constituir verdaderas fracturas. No hay una regla general para correlacionar la abertura superficial de las grietas con sus efectos en los diversos aspectos involucrados; no obstante, se han propuesto criterios para establecer la abertura máxima de grieta que puede ser tolerable. ⁽³⁾

Para medir la abertura superficial de las grietas, existen diversos dispositivos como las escalas graduadas con lente de aumento, las plantillas (como el

llamado “grieto metro”), las laminillas de espesor calibrado, etc. Sin embargo, Cuando se trata de medir la abertura de grietas muy finas, es común que existan discrepancias entre los resultados obtenidos por diferentes observadores; esto no sólo se debe a una imprecisión en el sistema de medición, sino también a la variabilidad de la abertura en una misma grieta. Debido a ello, es recomendable que al hacer estas mediciones, se marquen e identifiquen los sitios de lectura y se informe las aberturas máximas, mínimas y promedio de todas las determinaciones efectuadas en una misma grieta. ⁽³⁾

La abertura interna y la profundidad de las grietas puede determinarse mediante la aplicación de las pruebas que se describen en el capítulo de 6.3 de este trabajo; es decir, por medio de las pruebas no destructivas con ultrasonido o radiaciones. Por estos medios suele constatar que el desarrollo de la abertura interna de las grietas al aumentar su profundidad puede ser muy variable dependiendo de su origen, hay grietas que se cierran rápidamente a partir de la superficie, como en el caso de algunas de contracción plástica: grietas cuya superficies interiores permanecen aproximadamente paralelas a través del espesor de miembros delgados que se agrietan por contracción térmica o contracción por secado y grietas que en lo profundo pueden ser más abiertas que en la superficie, como a veces ocurre en losas de cimentación de gran espesor por efecto del gradiente térmico. ⁽³⁾

Es conveniente tener presentes estas características de las grietas cuando se planea su reparación, a fin de que el tratamiento y los materiales propuestos sean apropiados para corregirlas adecuadamente en todo su desarrollo interno. ⁽³⁾

6.3 Métodos de ensayo no destructivo en estructuras de concreto

La búsqueda de métodos de ensayo no destructivo para analizar el estado de las estructuras de concreto se remonta a tiempos muy lejanos en la historia (sencillas técnicas de inspección visual o acústica han sido utilizadas durante siglos). ⁽⁹⁾

Sin embargo, las técnicas con mayor potencial de uso en la actualidad, fueron introducidas hacia 1950, cuando el estudio de los fenómenos relacionados con la propagación de ondas en sólidos despejó horizontes para el avance de estos métodos. ⁽⁹⁾

En los últimos años, la aplicación práctica de los END se ve favorecida por los siguientes factores:

- Desarrollo de nuevos programas informáticos de cálculo (simulación por elementos finitos) y tratamiento de imágenes.
- Aparición de tarjetas de memoria de pequeño tamaño.

- Desarrollo de Internet como herramienta para la difusión de los conocimientos científicos y de los resultados de investigaciones.

Algunos campos de trabajo abiertos en el área que nos ocupa son:

- Posibilidades de aplicación combinada de varias técnicas.
- Interpretación de los resultados de los ensayos, aun por operarios no expertos.
- Concretar la influencia de distintas variables sobre el desarrollo de los ensayos.
- Verificación de técnicas en estructuras reales.
- Normalización de ensayos. ⁽⁹⁾

6.4 Técnicas basadas en la propagación de ondas:

- Métodos basados en la medida de la velocidad de propagación del sonido:

Descripción y fundamento del método:

Se basan en la propagación a través del concreto de ondas ultrasónicas longitudinales no perceptibles por el oído humano (10-150 kHz), procedentes de un emisor o generador de impulsos (palpador electro acústico). El pulso es captado por un receptor que lo transforma en un impulso eléctrico. Un circuito de tiempo permite determinar la velocidad de propagación de la onda. ⁽⁹⁾

Aplicaciones:

- Medida de uniformidad del material en una estructura.
- Medida del grosor de una capa de concreto (suelo, forjado, etc.).
- Monitorización en el tiempo de cambios en las propiedades del concreto.
- Evaluación de sistemas estructurales / Detección de defectos.
- Medida de la resistencia o del módulo de deformación del concreto.
- Estudio del proceso de fraguado del concreto. ⁽⁹⁾

Investigaciones recientes:

- Modelos de simulación por elementos finitos.
- Búsqueda de fuentes de ondas moduladas por excitación piezoeléctrica.
- Métodos basados en la reflexión del sonido (Eco-impacto y Eco-pulso):

Descripción y fundamento del método

Esta técnica fue desarrollada en el U.S.National Bureau of Standards en los años 80. ⁽⁹⁾

Un pulso de ondas acústicas generadas por un transmisor (Eco-pulso) o un golpe mecánico (Eco-impacto) se propaga a través del concreto experimentando reflexiones ante los cambios en densidad o módulo elástico. Las ondas reflejadas o "ecos" se convierten en señales eléctricas para ser analizadas mediante un osciloscopio. ⁽⁹⁾

Aplicaciones de los métodos basados en la reflexión de ondas acústicas:

- Identificación y cuantificación de grietas u oquedades que se sospechan en una estructura de concreto (control de calidad de la edificación).
- Medidas del espesor de elementos de concreto (pavimentos, solados, paredes, forjados, etc.) con errores inferiores al 3%.
- Localización de armaduras, tuberías o conductos en elementos de concreto. ⁽⁹⁾

Investigaciones llevadas a cabo en los últimos años

- Desarrollo de software para la monitorización de resultados (localización de defectos) mediante imágenes on-line.
- Aplicaciones comerciales automatizadas (movimiento mecanizado de transductores, control de presión, interpretación de resultados).
- Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas (RADAR):

Descripción

Técnica basada en la propagación y reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (300 MHz – 2.5 GHz). ⁽⁹⁾

Aplicaciones

- Localización de grandes oquedades.
- Determinación de humedades en edificios.
- *Detección de armaduras.*
- Determinación del contenido de agua en el concreto fresco.
- Estudio de pavimentos. ⁽⁹⁾

6.5 Emisión acústica:

Fundamento

Consiste en detectar la energía liberada en forma de ondas elásticas durante los procesos de agrietamiento de una materia

Las señales recibidas, se analizan por métodos analógicos o digitales. ⁽⁹⁾

Aplicaciones

- Detección de fisuras producidas a causa de fenómenos térmicos durante el fraguado del concreto, para poder tratarlas de una forma inmediata.
- Estudio y desarrollo de nuevos materiales cementantes.
- Estudio de la fisuración producida en el concreto por los ciclos de hielo/deshielo.
- Estudio y monitorización de grietas activas.

Localización preventiva de puntos de fractura. ⁽⁹⁾

6.6 Termografía por infrarrojos:

Descripción y fundamento del método

Se trata de un método térmico, basado en el principio de la conductividad térmica o capacidad para transmitir calor de los materiales. Se utiliza una cámara sensible a la radiación infrarroja que permite captar el flujo de energía emitido por una superficie y transformarlo inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en imágenes.

Aplicaciones

- Diagnóstico de paredes ocultas bajo frescos o pinturas.
- Detección de elementos ocultos (conducciones, armaduras etc.)
- Detección de humedades.

Detección de defectos de un determinado tamaño en estructuras de concreto, basándose en el diferente comportamiento térmico del aire y el concreto. ⁽⁹⁾

6.7 Tomografía del concreto hidráulico

La tomografía del hormigón armado es una técnica de ensayo no destructiva, capaz de brindar la información requerida para un diagnóstico preciso del estado de una armadura de hierro y su aptitud para soportar una estructura. Con ella se obtiene la reconstrucción tridimensional de la armadura de hierro presente dentro de una estructura, a partir de una gammagrafía, cuya información es digitalizada y analizada a través de un procesamiento computarizado. ⁽⁹⁾

En su aspecto instrumental, la gammagrafía es similar al uso, que para aplicaciones médicas se hace de los rayos X. Una fuente de rayos gamma iluminan el objeto y la radiación emitida se detecta en una gammagrafía. Su

tamaño es el de una placa radiográfica (35x45cm) y por lo tanto permite Examinar un volumen aproximadamente igual a esa área, por el espesor de la pieza. ⁽⁹⁾

La fuente de rayos gamma es un radioisótopo. Su pequeño tamaño y el hecho de no precisar una fuente de energía externa para su funcionamiento, se traducen en sencillez y practicidad. ⁽⁹⁾

El procedimiento permite además de la reconstrucción tridimensional de la armadura: identificar los hierros corroídos, detectar defectos, oquedades e inhomogeneidades en el hormigón, examinar vainas de pretensado, medir vacíos micrométricos en los interfaces hierro – cemento, adherencias y localizar zonas con sarro en el interior de los caños. ⁽⁹⁾

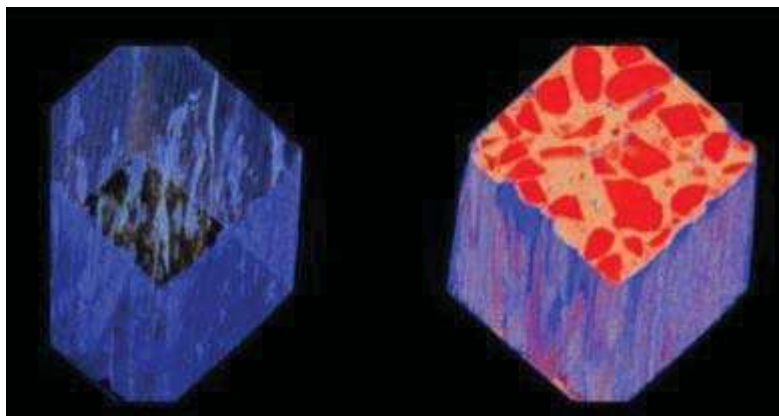


Figura 28. Tomografía del concreto

Obtenido en www.ultrasonic.de/article

6.8 Ensayo del concreto a compresión

En ingeniería, el ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza concreto hidráulico y metales (sobre todo aceros), aunque puede realizarse sobre cualquier material. ⁽⁸⁾

Se realiza preparando probetas normalizadas que se someten a compresión en una máquina universal. ⁽⁸⁾

A continuación veremos el procedimiento que se aplica para ejecución de este ensayo. ⁽⁸⁾

Aparatos:

Prensa de ensayo, que debe tener: rigidez suficiente para resistir esfuerzos del ensayo, sistema de rotula para hacer coincidir la resultante de la carga con el eje de la probeta, superficies de aplicación de la carga lisas y planas; entre otras. Regla graduada en mm. Balanza con capacidad mayor o igual a 25 Kg. ⁽⁸⁾

Procedimiento:

- Se limpian las superficies de las placas y caras de ensayo de la probeta. Se coloca la probeta sobre la placa inferior alineando su eje central con el centro de esta placa.
- Se colocan las probetas cúbicas con la cara de llenado en un plano perpendicular a la placa inferior de la prensa. Colocar las probetas cilíndricas asentadas en una de sus caras planas refrentadas.
- Asentar la placa superior sobre la probeta. Aplicar la carga en forma continua y sin choques a una velocidad uniforme (para una rotura en un tiempo mayor o igual a 100 segundos con una velocidad menor a $0.35 \text{ N/m}^2/\text{s}$ Si se conoce la carga aproximada de rotura, se podrá aplicar en la primera mitad de la carga a una velocidad mayor. Fijada la velocidad, especialmente en la segunda mitad de la carga, no se modificará más. La carga máxima se registra en N (Kgf) ⁽⁸⁾



Figura 29. Ensayo de una muestra de concreto sometida a compresion

Obtenido en [.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compresión](https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compresi%C3%B3n)

Expresión de resultados:

Resistencia a Compresión.

Se calcula la sección de ensayo según las formulas siguientes:

Probetas Cúbicas

$$S = (a_1 + a_2)/2 * (b_1 + b_2)/2$$

Probetas cilíndricas

$$S = 0.196 (d_1 + d_2)^2$$

CALCULO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN:

$R = P / S$

S: sección de ensayo en mm² o cm²

R: tensión de rotura N/mm² o Kg / cm²

P: carga máxima aplicada por la máquina. ⁽⁸⁾

7. EQUIPO PARA EVALUACIÓN PATOLÓGICA DEL CONCRETO.

7.1 Esclerómetro

El esclerómetro es un instrumento de medición empleado, generalmente, para la determinación de la resistencia a compresión en concreto hidráulico es ya sea en pilares, muros, pavimentos, etc. ⁽¹⁰⁾

Su funcionamiento consiste en una pesa tensada con un muelle. Dicha pesa tensada es lanzada contra el concreto y se mide su rebote. ⁽¹⁰⁾

Aunque no es un método excesivamente fiable, su uso está muy extendido. Proporciona valores aproximados y se emplea principalmente como método de comprobación, siendo menos usado que el ensayo de compresión. ⁽¹⁰⁾

En 1950 se diseñó el primer esclerómetro para la medición no destructiva del concreto. Patentado con el nombre SCHMIDT, su valor de rebote "R" permite medir la dureza de este material. Se ha convertido en el procedimiento más utilizado, a nivel mundial, para el control no destructivo en concreto. ⁽¹⁰⁾



Figura 30. Análisis con Esclerómetro

Obtenida en www.pce-iberica.es



Figura 31. Esclerómetro

Obtenida en www.pce-iberica.es

7.1.1 Esclerómetro digital

Esclerómetro digital: frente a los esclerómetros convencionales, la ventaja de incorporar una pantalla en la que se recogen valores mínimos y máximos de una serie cuyo número de medidas establece el usuario. Además de establecer de forma automática tablas de edad del concreto, descartar valores erráticos, mostrar la desviación estándar y corregir directamente la dirección de impacto, traduce el valor medio R a las unidades convencionales de resistencia, asigna un número a la medida y puede transferir todos los datos a documentos de entorno Windows a través de un PC. ⁽¹⁰⁾

Es un método muy subjetivo. Según quién lo haga y cómo lo haga, arrojará unos valores más o menos fiables. Algunas de las causas que pueden alterar el valor son: ⁽¹⁰⁾

- Si no está el esclerómetro perfectamente perpendicular con la superficie, nos dará un rebote menor. ⁽¹⁰⁾
- Si la superficie no está muy limpia y pulida nos dará valores menores (capas de pintura o polvo crean una capa blanda que amortigua el golpe).
- El concreto es una mezcla de cemento, grava y arena. Si golpeamos sobre una piedra nos dará una dureza mayor.
- Si es concreto armado corremos el riesgo de golpear cerca de una barra corrugada de acero, con una dureza mucho mayor. ⁽¹⁰⁾



Figura 32 Esclerómetro Digital

Obtenido en www.pce-iberica.es

7.2 Equipo de ultrasonido

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto hidráulico endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los destructivos. ⁽¹¹⁾

En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea afectadas por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al concreto hidráulico, se suele aplicar esta técnica con el fin de efectuar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio.

Efectuado éste, se podrán investigar las zonas con mayor daño con técnicas destructivas, y emitir una opinión más fundada sobre la estructura. En general se puede señalar, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos. ⁽¹¹⁾

Entre las pruebas no destructivas se encuentra el uso del equipo ultrasónico. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad, entre otras características. Esto se logra a través de mediciones de la velocidad ultrasónica sobre el material que se va a probar. ⁽¹¹⁾

7.2.1 Alcances

Los materiales que se ensayan con este método son heterogéneos, como la madera y el concreto; se excluyen los metales, ya que provocan una serie de irregularidades que afectan los resultados obtenidos. ⁽¹¹⁾

Así el equipo hace posible conocer el concreto en las siguientes cualidades: homogeneidad, la presencia de fisuras, los huecos, los cambios en concreto debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como también la calidad del concreto. ⁽¹¹⁾

7.2.2 Generalidades

Equipo

Existen varios tipos de equipos, pero en lo esencial poseen transductores capaces de marcar el tiempo de propagación de una onda a través del concreto. ⁽¹¹⁾

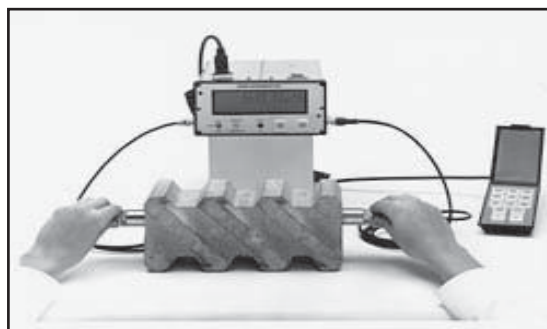


Figura 33 Equipo Ultrasónico
Obtenido en www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

7.2.3 Utilización

Como Usar el Equipo

Cuidadosamente se elige la muestra o el elemento que se va a ensayar y se toman tres lecturas como mínimo, anotando el tiempo de propagación de la onda en el concreto y la distancia entre transductores o terminales; estas distancias no deben exceder de 400 mm y se recomienda que sean lo más constantes posibles para asegurarse de que las lecturas obtenidas sean uniformes. ⁽¹¹⁾

Una vez que la onda se transmite a través del concreto, es captada por el transductor receptor, el cual convierte la energía mecánica de la onda en pulso electrónico. Después de recibido, se obtendrá el tiempo de propagación de la onda en el concreto que, junto con la distancia entre transductores, nos ayudará a saber la velocidad de pulso. Esta velocidad se compara con diferentes criterios existentes y es así como se conocerá el estado del concreto ensayado. ⁽¹¹⁾

Se debe asegurar que los transductores tengan un buen acoplamiento sobre la superficie del concreto. Esto se logra colocando entre la superficie de concreto y los transductores vaselina. En superficies muy rugosas se deberá efectuar un tratamiento previo. Al colocar los transductores sobre la superficie del concreto se debe: ⁽¹¹⁾

- Procurar no moverlos, ya que se puede generar ruido y consecuentemente lecturas erróneas.
- Mantener firmes los transductores hasta que la lectura sea definida. ⁽¹¹⁾

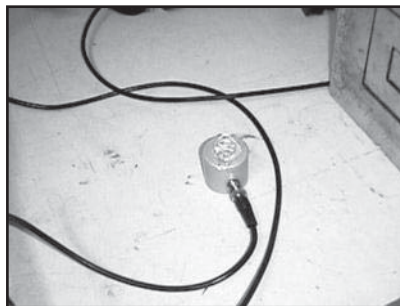


Figura 34. Puntos de ensayo del ultrasonido
Obtenido en www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

Criterios para la Selección de Puntos de Ensayo.

Antes de aplicar la prueba, es necesario efectuar un reconocimiento visual de los puntos que se van a ensayar, con el fin de determinar la rugosidad de la superficie, la presencia de huecos y fisuras que afectarán nuestra prueba. ⁽¹¹⁾

Es necesario quitar el acabado de la superficie (yeso, cemento, pintura, etc.) con el fin de evitar resultados erróneos por la posible separación entre el acabado y el elemento que se va ensayar. ⁽¹¹⁾

Cuando la superficie es rugosa, es necesario pulirla con una piedra de pulir, con el fin de evitar que los transductores obtengan una señal defectuosa. ⁽¹¹⁾

En la figura se muestran las opciones para instalar los transductores en la superficie de prueba de la probeta. La transmisión puede ser directa, semidirecta o indirecta. ⁽¹¹⁾

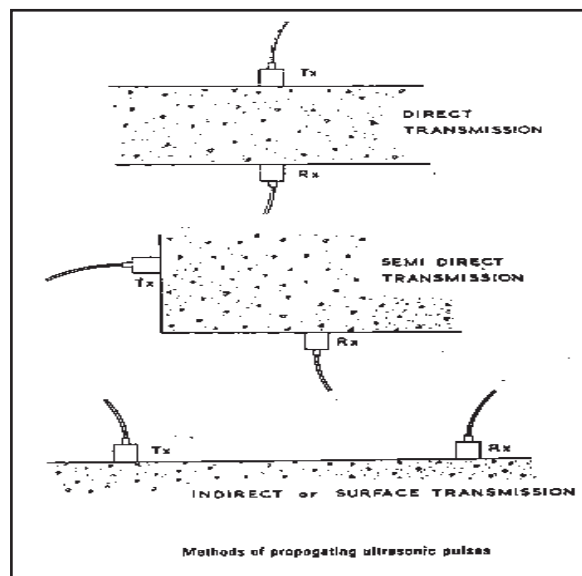


Figura 35. Esquema Transmisiones
www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

Mientras sea posible deberá utilizarse la transmisión directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida. Sin embargo, algunas veces tiene que examinarse el concreto mediante el uso de trayectorias diagonales y, en estos casos, la semidirecta puede usarse tomando en cuenta que la distancia que se va a medir será en diagonal, aplicando el teorema de Pitágoras. ⁽¹¹⁾

La transmisión indirecta es la menos satisfactoria, ya que además de su relativa insensibilidad, nos da medidas de la velocidad de pulso que usualmente tienen la influencia de la capa de concreto cercana a la superficie, que no serán representativas del concreto en estratos más profundos. Aún más, la longitud de la trayectoria está menos definida y no resulta satisfactorio el tomarla como la distancia de centro a centro de los transmisores; para corregir esto perfectamente, debe adoptarse el método mostrado en la figura siguiente, para determinar la velocidad de pulso. ⁽¹¹⁾

En este método, se coloca el transmisor en un punto elegido de la superficie y el receptor sobre los puntos sucesivos a lo largo de una misma línea, la distancia centro a centro se obtiene directamente para cada punto, con su tiempo de propagación respectivo. El inverso de la pendiente de la línea recta dibujada entre dos puntos de la gráfica de distancia en contraposición con el tiempo, nos da la velocidad promedio del pulso en la superficie. (Ver el esquema adjunto).⁽¹¹⁾

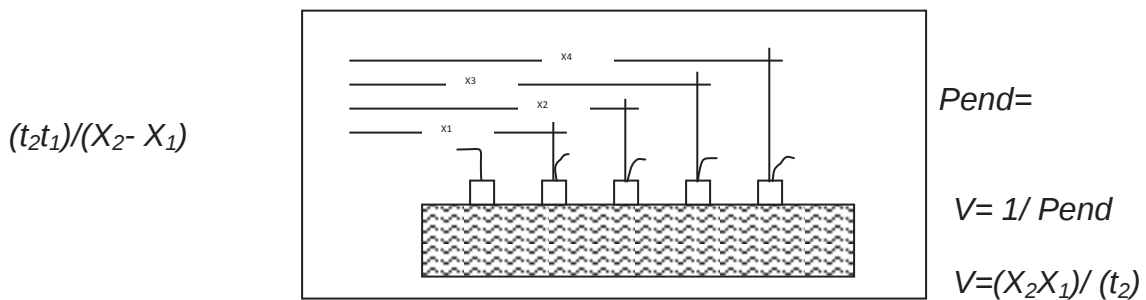


Figura 36. Colocación de transmisor en distintos puntos sobre una misma línea
www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

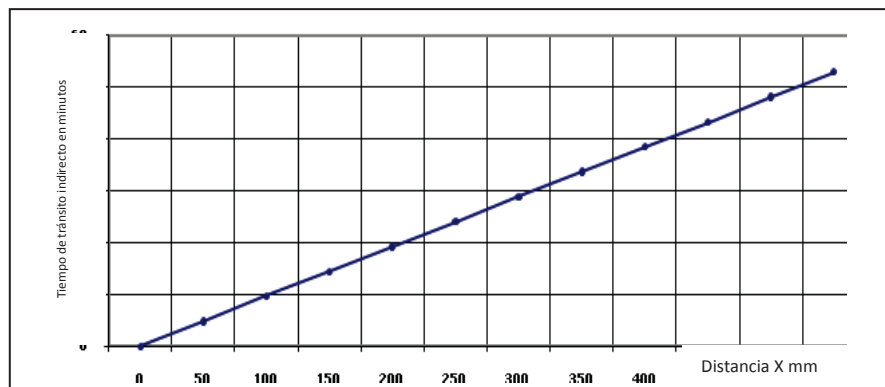


Figura 37. Gráfica para determinar la distancia de tránsito con arreglo indirecto.

www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

También se ha visto que la velocidad de pulso determinada por el método indirecto es menor que la que se obtiene con el método directo. Cuando sea posible efectuar mediciones por varios métodos, se establecerá una relación entre ellos y podrá determinarse el factor de corrección.⁽¹¹⁾

Cuando no sea posible el método directo, un valor aproximado para obtener la velocidad mediante el método indirecto será:

$$V_D = 1,05 V_1$$

Donde:

V_D = Velocidad de pulso obtenida usando el método directo.

V_1 = Velocidad de pulso obtenida usando el método indirecto. ⁽¹¹⁾

Si los datos de la gráfica de distancia en contraposición con el tiempo no están en línea recta (ver esquema 5), es decir, que hay cambios de pendiente, significa que el concreto cercano a la superficie es de calidad variable o que existe una fisura en el concreto en la línea sobre la cual se realiza la prueba. Lo anterior se comprueba cuando la velocidad comienza a bajar el espesor del estrato afectado se puede calcular como sigue: ⁽¹¹⁾

$$T = (X_0/2) * ((V_s - V_d)/(V_s + V_d))^{0.5}$$

Donde:

t = espesor de la capa de concreto afectada.

X_0 = distancia en la cual ocurre el cambio de pendiente.

V_d = velocidad de pulso en concreto dañado.

V_s = velocidad de pulso en concreto no dañado. ⁽¹¹⁾

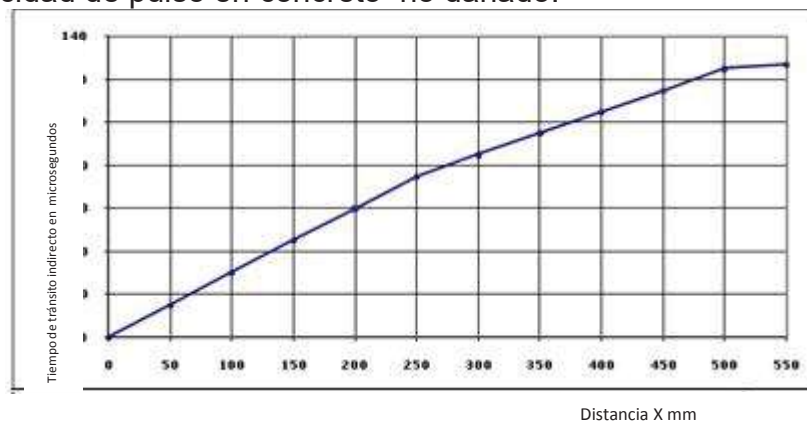


Figura 38. Gráfica de distancia en contraposición con el tiempo.
www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

Las condiciones de prueba influyen en la velocidad de pulso; por lo tanto, debemos tener en cuenta las siguientes:

- La longitud de la trayectoria es insignificante cuando no es menor que 100 mm para un agregado de 20 mm, o no menor que 150 mm para un agregado de 40 mm.
- La velocidad de pulso no se verá afectada al hacer mediciones en dos dimensiones diferentes del elemento, siempre y cuando no se varíe el ángulo recto entre ellos.

- c) La influencia del refuerzo generalmente es pequeña si las barras se encuentran perpendicularmente a la trayectoria del pulso (cabe recordar que la velocidad del pulso será mayor en las barras que el concreto); la influencia es significativa si las barras están en la dirección del pulso. En general, hay que evitar aplicar el pulso ultrasónico cerca de las barras de acero, ya que entonces se deberán corregir los resultados con factores de ajuste. Si al aplicar el pulso, el tiempo de propagación se incrementa en gran medida, lo mejor es buscar otra parte del elemento y hacer ahí las mediciones, ya que los factores de corrección son sólo aproximaciones. Para evitar las mediciones en las zonas de armadura, es conveniente utilizar un "Pacómetro" o detector de armaduras, este equipo permite delinear las zonas donde se encuentra el acero de refuerzo.
- d) La humedad en el concreto puede ser reducida; sin embargo puede ser significativa en el pulso ultrasónico. En general, la velocidad se incrementará a medida que aumenta el contenido de humedad, y con ello se puede obtener un concreto de buena calidad en lugar de un concreto pobre.⁽¹¹⁾

Al emplear el pulso ultrasónico, el aspecto más importante que se debe considerar es el número de elementos ensayados, ya que entre mayor sea la muestra se tendrán más elementos de comparación para poder obtener un juicio acerca de la calidad del concreto, la selección de los puntos debe hacerse en forma aleatoria.⁽¹¹⁾

Cuando hay una fisura en el concreto, el pulso ultrasónico nos permitirá determinar su profundidad e inclinación. Para obtener la profundidad, las mediciones se harán colocando los transductores uno a cada lado de la fisura a una distancia "x", procurando que sean en la parte más gruesa de la misma. A continuación se repetirá la lectura a doble distancia de la anterior.⁽¹¹⁾

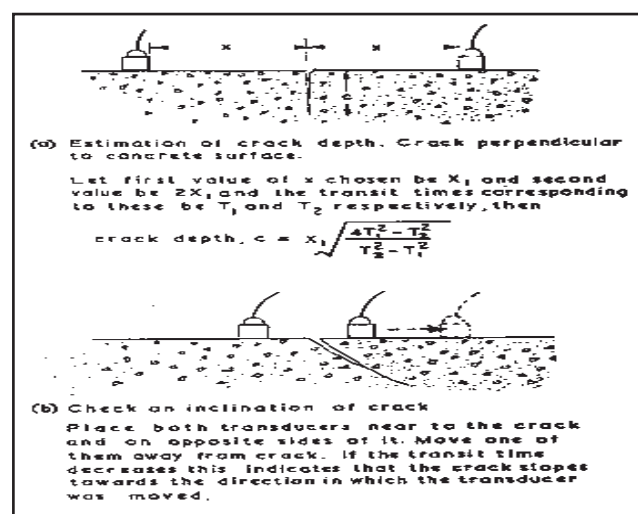


Figura 39. Medición profundidad de grietas.

Obtenido en www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

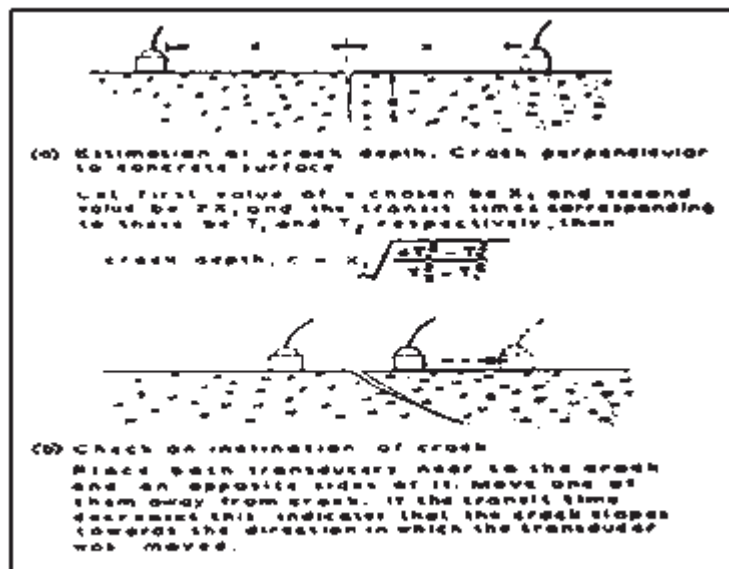


Figura 40. Medición de inclinación de grietas.

Obtenido en www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

Para determinar la inclinación, se colocan los transductores a los lados de la fisura y después se mueve uno de ellos alejándolo de la fisura. Si al efectuar esta operación la lectura del tiempo de propagación disminuye, significa que la fisura presenta inclinación hacia ese lado. ⁽¹¹⁾

Registro de Datos.

Para llevar el registro de datos se necesita una libreta de registro, una planta tipo o croquis de los puntos que se van a muestrear y datos del edificio. En la Libreta se registra la distancia, el tiempo de propagación y tipo de lectura para Cada elemento ensayado, ubicación exacta del elemento ensayado, T° ambiente y humedad. ⁽¹¹⁾

Interpretación de datos

Gráficas y tablas de correlación de datos obtenidos.

El primer resultado que se debe obtener de los datos recopilados es la velocidad de pulso en el elemento que se va a ensayar, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión. ⁽¹¹⁾

$$\text{Velocidad de Pulso (km/seg)} = \frac{\text{Distancia entre transductores (cm)} * 10}{\text{Lectura de tiempo (microseg)}}$$

La velocidad se determina para las tres lecturas realizadas a cada elemento y, posteriormente, se obtiene un promedio. Esta velocidad de pulso es la más conveniente. Con este dato, podemos determinar la calidad del elemento

Probado, consultando algunos de los criterios de clasificación de calidad que se muestran en las tablas siguientes. ⁽¹¹⁾

Tabla 13 Clasificación de la calidad del concreto por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman.	
Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del concreto
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Tabla 14 Evaluación la calidad mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros.	
Velocidad de pulso m/seg	Condición del concreto
Más de 3000	Buena
De 2500 a 3000	Regular
Menos de 2130	Pobre

Tabla 15 Velocidad mínima de pulso en estructuras típicas.	
Tipo de obra	Velocidad mínima de pulso para su aceptación m/seg
Selecciones T de concreto reforzado	4570
Unidades de anclaje de concreto reforzado	4360
Marcos de edificios de concreto reforzado	4110
Losas de entre piso	4720

Para determinar la profundidad de una fisura, se cuentan con dos tiempos t_1 y t_2 para distancias X y $2X$, respectivamente, dicha profundidad se obtiene mediante la siguiente expresión: ⁽¹¹⁾

$$C = X (4(t_1^2 + t_2^2)/(t_2^2 - t_1^2))^{0.5}$$

Donde:

C = profundidad de la grieta

X = distancia inicial

t_1 = tiempo de la distancia inicial (X)

t_2 = tiempo del doble de la distancia ($2X$)

Todos los datos y resultados obtenidos se anotan en la tabla de interpretación de datos.

Para obtener el módulo de elasticidad dinámico a partir de la velocidad de pulso, se cuenta con las siguientes expresiones:

1. Para probetas de laboratorio : $Ed = 1.02 * V^2 * W * 10^5$
2. Para losas : $Ed = 0.961 * V^2 * W * 10^5$
3. Para concreto en masa : $Ed = 0.866 * V^2 * W * 10^5$

Donde:

Ed = módulo dinámico de elasticidad del concreto

V = velocidad de pulso

W = Peso volumétrico del concreto

No es fácil estimar la relación que existe entre el pulso ultrasónico y la resistencia del concreto; pues el tipo de agregado, la relación agregado-cemento, la edad del agregado y las condiciones de curado influyen en ella. ⁽¹¹⁾

El equipo puede emplearse para llevar el control del concreto en una construcción, esto se logra mediante el uso de cilindros de prueba. En ellos se hacen mediciones de la velocidad de pulso y resistencia a compresión, con estos datos se hace una gráfica de resistencia en contraposición con la velocidad de pulso que servirá como referencia y así poder hacer ensayos al concreto ya colocado en elementos estructurales, para lo cual basta con medir la velocidad de pulso en cada elemento y compararla con la gráfica obtenida de antemano en los cilindros de prueba. ⁽¹¹⁾

Calibración y mantención

Proceso de calibración del Equipo.

El equipo cuenta con una barra de calibración, la que tiene grabado en su costado el tiempo de propagación del pulso por dicha barra. Para calibrarse se colocarán los transductores debidamente engrasados en los extremos de la barra calibradora y por medio del botón de ajuste, que se encuentra al frente del aparato, se iguala la lectura de la barra calibradora. Esta operación se efectuará al iniciar las mediciones y estando en operación durante períodos de una hora. ⁽¹¹⁾

7.2.4 Ventajas y desventajas del equipo

El equipo proporciona grandes ventajas, entre ellas podemos mencionar su poco peso, fácil uso y manejo, pero sobre todo la confiabilidad en sus resultados, ya que una forma rápida y sencilla permite conocer el estado que guarda el concreto del elemento ensayado. ⁽¹¹⁾

Presenta como desventaja, que los cables transmisores en varias ocasiones presentan falsos contactos debido al exceso de movimiento, con lo cual se dificulta efectuar las lecturas. ⁽¹¹⁾

Los métodos ultrasónicos son afectados por algunos factores, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- Contacto entre superficies del concreto y transductores. Debe haber un íntimo contacto acústico; las superficies moldeadas, en general no presentan problemas y si presentan alguna rugosidad, se puede eliminar frotando con piedra de pulir. Los transductores deben apretarse contra el concreto y, para mejorar el contacto, se suele colocar una película de vaselina entre concreto y transductor. ⁽¹¹⁾
- Longitud del recorrido. Debido a la heterogeneidad del concreto y, para evitar sus efectos, es conveniente que el recorrido sea más bien extenso. Para un mismo concreto, se han encontrado diferencias de velocidad de propagación, al medir distintos espesores. ⁽¹¹⁾
- Humedad del concreto. En general, la velocidad de propagación del sonido en el concreto aumenta a medida que su contenido de humedad es mayor. ⁽¹¹⁾
- Armaduras Metálicas. Las armaduras metálicas presentes en el concreto, afectan considerablemente las medidas de velocidad, debido a que en el acero, la velocidad de propagación puede ser hasta 2 veces mayor que en el concreto. ⁽¹¹⁾

En vista de la influencia de estos, y otras variables, estos métodos no son recomendables para determinar la resistencia del concreto. Sin embargo, es posible utilizarlos exitosamente para establecer la uniformidad del concreto. ⁽¹¹⁾

7.3 Equipo para medir la corrosión

Gecor 8™ El sistema más avanzado del mundo para analizar la corrosión del acero de refuerzo del concreto en estructuras existentes. ⁽¹⁴⁾



Figura 41. Gecor 8

www.ndtjames.com/spanish/catalog/corrosionTesting/gecor8

El sistema más avanzado del mundo para el análisis de la corrosión de las barras de refuerzo de acero del concreto. ⁽¹⁴⁾

El Gecor 8™ de James Instruments representa la tecnología mas avanzada para determinar los ritmos de corrosión de las barras de refuerzo de acero. Combina sistemas de vanguardia a base de microprocesador y tecnología “flash” por computadora con las investigaciones mas avanzadas en análisis de ritmos de corrosión de barras de refuerzo. ⁽¹⁰⁾

El Gecor 8™ tiene las características siguientes:

1. Un método rápido para representar gráficamente los ritmos de corrosión de una estructura.
2. Una técnica avanzada de confinación de modulación para un análisis preciso del ritmo de corrosión.
3. Una técnica nueva de análisis del ritmo de corrosión para usarse con estructuras muy mojadas o sumergidas. ⁽¹⁴⁾

El método rápido de representación grafica del Gecor 8™ permite al ingeniero clasificar rápidamente las áreas de una estructura, mientras que el programa incorporado de la unidad puede analizar los datos gráficamente y producir mapas de contorno de las zonas en las cuales se sospecha la existencia de problemas. Y nuestra técnica avanzada de confinación de modulación ofrece una medida precisa de la resistencia real a la polarización de la barra de refuerzo de acero. ⁽¹⁴⁾

Al aprovechar los avances mas recientes en los sistemas de conexión y tecnologías de almacenamiento de bases de datos, el Gecor 8™ resulta ser un sistema de análisis de ritmos de corrosión que es fácil de usar, confiable, automático e inteligente. Un sistema que puede ahorrarles tiempo, dinero, y esfuerzos a los ingenieros al evaluar las estructuras para su rehabilitación. ⁽¹⁴⁾

8. TÉCNICAS DE REPARACIÓN.

Tratamiento de grietas según su actividad

Criterios comunes para la reparación de grietas

Existen dos aspectos principales que pueden utilizarse para establecer criterios de reparación de grietas, independientemente de su origen y abertura; éstas se refieren a sus condiciones de actividad y de humedad. Es decir, al definirse si una grieta es activa o inactiva, y si se encuentra en condición seca o en presencia de agua, se establece una característica de la grieta que permite aplicar determinados criterios para su tratamiento correctivo. ⁽³⁾

Como ya se mencionó, hay grietas que tienen movimiento o activas y grietas que no lo tienen o inactivas. Un criterio de carácter general es admitir que las grietas activas deben repararse con un material que posea una flexibilidad apropiada al movimiento de la grieta y que las grietas inactivas pueden aceptar la reparación con un material rígido, si así se juzga necesaria. ⁽³⁾

8.1 Tratamientos de grietas activas

Para reparar las grietas que tienen movimiento, o grietas activas, normalmente es necesario abrirlas o alargar su trayectoria para formar una ranura de sección rectangular cuya relación entre ancho y profundidad dependerá del material que se utilice para rellenarla. Los materiales que de ordinario se destinan a esta aplicación son los que se describen a continuación. ⁽³⁾

- Materiales y productos bituminosos

En esta clasificación se incluyen dos grupos: las masillas o mástiques y los termoplásticos.

Las masillas son productos de consistencia blanda, normalmente a base de asfaltos de bajo punto de fusión, con cargas inertes incorporadas en forma de polvo o fibras. Por su fácil ablandamiento con el calor y su poca resistencia al desgaste, estos productos no resultan adecuados para superficies verticales o que se hallan expuestas a la abrasión. Suelen admitir una elongación no mayor de 15 %, y para colocarlas en las grietas debe abrirse una ranura cuya profundidad sea por lo menos igual al doble de su ancho. ⁽³⁾

Los termoplásticos son materiales que pueden derretirse repetidamente por calentamiento, y en cuyo endurecimiento no suelen intervenir reacciones químicas. En este grupo se hallan los asfaltos modificados con hule, la brea y el alquitrán de hulla, que cuando se calientan a temperaturas mayores de 100 °C adquieren la consistencia de un fluido viscoso. Estos materiales también se ablandan con altas temperaturas ambientales, si bien es menor grado que las Masillas, por lo que tienen limitaciones de uso similares. Su elongación máxima es del orden de 25 %, y para el llenado de las ranuras se requiere que éstas tengan una profundidad aproximadamente igual a su ancho.

Si permanecen expuestas al sol, estos materiales pueden endurecerse y perder su elasticidad al cabo de pocos años, debido a la acción de los rayos ultravioleta. ⁽³⁾

Por su bajo costo comparativo, los materiales y productos bituminosos suelen emplearse para sellar grandes longitudes de juntas con poco movimiento; por ejemplo, en canales revestidos de concreto que conducen agua a baja velocidad, donde no hay superficies verticales y la temperatura es relativamente estable. Además estos productos se encuentran en el mercado y son recomendables como selladores en juntas de pisos de concreto (de tipo elastobit o similar). ⁽³⁾

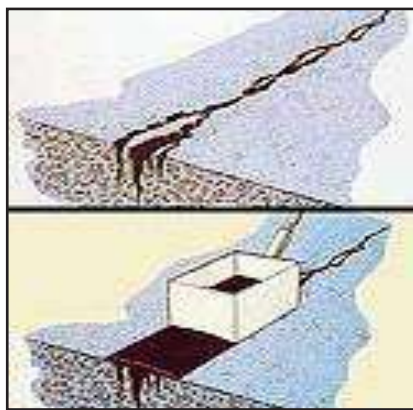


Figura 42 Mastic líquido: Curado especial para la reparación de grietas

Obtenido en www.pavimentosonline.com/emcol/images

- Productos elastoméricos

Un elastómero es un material semejante al hule que, después de sufrir una gran deformación, recobra en poco tiempo su dimensión original. ⁽³⁾

Hay una gran variedad de productos selladores de esta clase como los poli sulfuros, los poliuretanos, los silicones, los acrílicos y las resinas epóxicas modificadas. Algunos son de un solo componente, en tanto que otros pueden ser de dos o más. Sus ventajas sobre los productos bituminosos son muchas; por ejemplo, no requieren calentamiento previo para su aplicación, exhiben mayor elongación y mejor recuperación se adhieren mejor al concreto y no se ablandan con las altas temperaturas ambientales. ⁽³⁾

El costo de los elastómeros es bastante mayor que el de los productos bituminosos, por lo que su empleo suele limitarse a los casos en que estos últimos no son aplicables; es decir, en superficies verticales y en todos aquellos casos en donde se esperan movimientos importantes, exposición a temperaturas ambientales altas y, en general, donde las condiciones de servicio lo requieren. ⁽³⁾

Cuando esas condiciones son particularmente formulados para resistirlas, tal es el caso del sellador a base de un compuesto denominado Viton, que se recomienda para servicio de alta temperatura en contacto con aceites y combustibles. ⁽³⁾

- Sellador sobre compuesto

Hay ocasiones en que no puede aplicarse para el tratamiento de una grieta activa el método y los productos selladores descritos, ya sea porque el movimiento no se produce en un mismo plano, porque el movimiento es excesivo o porque la grieta se localiza en una posición donde no se puede o no debe hacerse una ranura en la estructura. En tales casos, es posición donde no se pueden o no debe hacerse una ranura en la estructura. En tales casos, es posible hacer un sellado superficial sobreponiendo a lo largo de la grieta una tira de material flexible adherida al concreto en sus orillas laterales, es decir, dejando sin adherir una franja central de la tira sobrepuesta. ⁽³⁾

Para aplicar este procedimiento, primero se cubre la grieta en toda su longitud con un cinta adhesiva del papel (masking tape) de aproximadamente 2 cm. de ancho. A continuación se aplica un adhesivo adecuado sobre el concreto hacia ambos lados de la cinta, para cubrir dos franjas laterales de unos 4 cm. de ancho cada una. Finalmente, se sobrepone una tira del material flexible con un ancho del orden de 10 cm., de manera que se adhiera al concreto tapando la grieta y quede libre de deformación la franja central de 2 cm. de ancho ocupada por la cinta de papel previamente desprendida. ⁽³⁾

Para esta aplicación se han obtenido buenos resultados, utilizando tiras de Hypalon (Polietileno clorosulfonado) adheridas con resina epóxica y también tiras de hule butilo adheridas con alquitrán de poliuretano. ⁽³⁾

- Recubrimiento con membrana

En los casos en que el agrietamiento está muy difundido, puede no resultar práctico tratar de sellar cada grieta en forma individual. En estas condiciones, debe considerarse la posibilidad de recubrir toda la superficie con una membrana flexible que se adhiera adecuadamente al concreto y cubra las grietas. Estas membranas pueden ser productos líquidos o láminas delgadas de materiales flexibles. ⁽³⁾

Frecuentemente, los productos líquidos son emulsiones y soluciones de bitumen, brea o látex. Su aplicación deber hacerse en la forma y con el espesor que recomienda el fabricante. Su funcionamiento resulta aceptable cuando se tratar de grietas menudas con movimientos mínimos. En caso de Grietas con aberturas notables (mayores de 0.15 mm) y con mayores movimientos, es preferible usar láminas flexibles adheridas al concreto. ⁽³⁾

Las láminas flexibles pueden ser de hule butilo, cloruro de polivinilo, polietileno, polietileno clorosulfonado (Hypalon) y otros más. La adhesión de

estas láminas al concreto debe hacerse con un adhesivo compatible entre los dos materiales; para ellos, es necesario consultar al fabricante. Antes de aplicar el adhesivo, todas las grietas deben cubrirse con cinta adhesiva de papel (masking tape).⁽³⁾

Después de aplicar el adhesivo y antes de colocar la lámina, la cinta debe desprenderse para dejar libre de formación el material de la lámina en el lugar de las grietas.⁽³⁾

Este procedimiento para tratar superficies de concreto afectadas por muchas grietas activas resulta particularmente útil en el caso de estructuras que almacenan o tiene contacto permanente con agua en reposo o con poca velocidad. Es también aplicable, desde luego, cuando se trata de grietas inactivas, en cuyo caso puede omitirse el cubrimiento previo de las grietas con cinta adhesiva de papel.⁽³⁾

8.2 Tratamiento de grietas inactivas

Las grietas sin movimiento, o grietas inactivas, suelen sellarse con un material rígido, aunque también puede sellarse con un material flexible, dependiendo de las condiciones de agrietamiento, el objetivo fundamental de la reparación y el costo comparado.⁽³⁾

Por ejemplo, cuando se pretende restablecer la capacidad estructural del concreto a través de una grieta inactiva tratada en forma individual, es requisito indispensable sellarla en toda su profundidad con un material rígido, resistente y que se adhiera satisfactoriamente al concreto. En cambio, cuando se necesita impermeabilizar una estructura de concreto afectada por múltiples fisuras inactivas, puede ser suficiente sellarlas sólo con superficialmente, recubriendo toda la superficie afectada con un material que produzca la impermeabilidad necesaria. En primer caso, no suele haber alternativa y el tratamiento debe hacerse introduciendo en la grieta una sustancia fluida que al endurecer adquiere la rigidez y las propiedades estructurales requeridas.⁽³⁾

En el segundo caso, existe la opción de emplear un recubrimiento flexible que, en esta aplicación puede resultar más funcional y económico que uno rígido. Considerando el caso más frecuente, en que se busca restablecer total o parcialmente la capacidad estructural del concreto, los materiales rígidos más frecuentemente utilizados para el relleno de las grietas inactivas son: resinas epóxicas de diversa viscosidad, resinas poliéster, lechadas de cemento y agua de fluidez variable, sin y con la incorporación de aditivos como el látex, morteros de resina epóxica, de cemento Portland o de cemento sin contracción, y concretos de resina epóxica o de cemento Portland.⁽³⁾

En términos generales, si se comparan los compuestos epóxicos con los de cemento Portland, resulta que los epóxicos son más resistentes y se adhieren mejor al concreto antiguo. También, cuando se utilizan como fluidos inyectables, pueden penetrar en grietas con menor abertura; sin embargo, su costo es considerablemente mayor. De ahí que la selección del material

adecuado debe hacerse en cada caso con base en la condición estructural del concreto cuya integridad pretende restituirse, en la abertura y posición de las grietas y en el aspecto económico, haciendo un balance de estos aspectos. ⁽³⁾

- Compuestos epóxicos

Las resinas epóxicas son materiales de termo fraguado, es decir, son materiales que endurecen por reacciones químicas que liberan calor. Su endurecimiento no es reversible a temperaturas ambientales ordinarias, es decir, no se reblandecen por el calentamiento en condiciones normales de servicio. La reacción química que conduce al endurecimiento se produce al mezclar la resina con otro compuesto que actúa como catalizador; éste se designa como componente de curado. El producto endurecido presenta muy poca contractación y tiene excelentes propiedades adherentes y de resistencia mecánica a compresión y tensión, así como de resistencia a la abrasión, al ataque químico y a los agentes atmosféricos. ⁽³⁾

Existe una gran variedad de formulaciones epóxicas para diferentes usos. En el campo de la construcción se dispone de resinas con diversa viscosidad (desde muy fluidas hasta de consistencia pastosa); resinas que pueden adherirse sobre concreto en estado seco, húmedo o incluso bajo agua; resinas que sirven como adhesivos entre concreto fresco y concreto endurecido, y resinas que se mezclan con el concreto convencional de cemento Portland para modificar sus propiedades. Además, para disminuir la rigidez del producto en estado endurecido, existen resinas epóxicas modificadas con polisulfuros o con alquitrán de hulla, con lo que se consigue darles suficiente flexibilidad para admitir deformaciones normales en las estructuras y los movimientos en las juntas y en las grietas del orden de $\pm 5\%$, aproximadamente. ⁽³⁾

En la reparación de grietas inactivas, las resinas epóxicas suelen preferirse cuando el restablecimiento de la capacidad estructural del concreto es un requisito fundamental y cuando el volumen que va a utilizarse no es tan grande como para que su costo resulte prohibitivo. Su aplicación puede hacerse: ⁽³⁾

1) como resina sola (sin carga inerte) con viscosidad adecuada para introducirla por inyección a presión a través de grietas finas con aberturas mínimas del orden de 0.05 mm, aproximadamente. ⁽³⁾

2) como resina en forma de pasta para obturar grietas algo más abiertas (de 1 o 2 milímetros en adelante) en posición vertical o hacia arriba. ⁽³⁾

3) como mortero epóxico, mezclando la resina con arena fina pasada por la malla núm.16, para tapar grietas más anchas y otros espacios donde el ancho mínimo sea de unos 5 mm, y 4) como concreto epóxico, incorporando gravilla con tamaño adecuado para rellenar fracturas amplias o espacios mayores de 25 milímetros. ⁽³⁾



Figura 43 Fotografía en la cual se muestra la aplicación de Inyecciones Epoxicas

Obtenido en www.rfa.cl/images/repes/image

- Resinas poliéster

Las resinas poliésteres son productos de uno o dos componentes cuya principal forma de aplicación es como recubrimiento, aunque también se ha utilizado para sellar grietas en el concreto. Debido a que su comportamiento en condición húmeda no es satisfactorio, su empleo suele limitarse a casos en los que el concreto debe permanecer continuamente seco. En estas condiciones, y en casos en que el trabajo consiste en sellar grietas final por inyección o gravedad, puede considerarse el empleo de las resinas poliéster como alternativa de las resinas epóxicas, ya que las primeras suelen tener menor viscosidad y consecuentemente, mayor penetración y su costo unitario es algo menor. ⁽³⁾

- Mezclas con cemento Portland

Aparte de las mezclas con algún tipo de cemento Portland, de los mencionados, también se dispone comercialmente en el mercado local de morteros sin concentración predosificados en seco (grouts), elaborados a base de cemento Portland, aditivos estabilizadores de volumen y arena fina. ⁽³⁾

Como ya se mencionó, las mezclas elaboradas a base de cemento Portland, tiene gran desventaja si se les compara con las de resina epóxica, excepto en lo que se refiere al costo. De ahí que las mezclas con cemento Portland tienen mayores oportunidades de uso cuando los requisitos estructurales en la rehabilitación de grietas no son demasiados estrictos y/o cuando los volúmenes de materiales requeridos para la rehabilitación son importantes. ⁽³⁾

Para juzgar la aplicabilidad de las mezclas con cemento Portland en el tratamiento de grietas inactivas, es necesario considerar también su abertura. En términos prácticos, se estima que normalmente el sellado de grietas final en el concreto con una lechada de cemento y agua no produce resultados satisfactorios; por consiguiente, para grietas con aberturas inferiores a 1 mm, se recomienda el tratamiento con resinas epóxicas. Para grietas con aberturas

mayores que 1 mm, aproximadamente, es factible emplear lechadas de cemento inyectadas a presión, en las que es deseable incorporar un aditivo, como el látex, que mejore su adhesividad al concreto y reduzca su contracción. La introducción de estas lechadas por gravedad, puede resultar factible si las grietas se localizan sobre una superficie horizontal y su abertura mínima es de unos 2 mm. Para grietas más abiertas del orden de 5 a 10 milímetros de ancho mínimo, es pertinente añadir arena fina pasada por la malla núm. 16 con una proporción en volumen de una parte de cemento por dos y media partes de arena, o bien utilizar un mortero comercial sin contracción (grout). Finalmente, para el relleno de grandes fracturas en que las aberturas exceden de 25 mm, es conveniente añadir, a cualquiera de los dos morteros anteriores, una gravilla cuyo tamaño máximo no sobrepase la cuarta parte del ancho de la fractura. ⁽³⁾



Figura 44 Reparación de grieta por medio de inyección de poliuretano

Obtenido en www.rfa.cl/images/repes/image

8.3 Tratamiento de grietas según su humedad

El estado de humedad del concreto en el interior de una grieta es una condición importante porque determina el procedimiento idóneo y el material adecuado para su tratamiento, independientemente de que la grieta sea activa o inactiva. En términos generales, pueden considerarse tres estados de humedad del concreto en el interior de una grieta; ⁽³⁾

- 1) estado prácticamente seco
- 2) estado húmedo, con o sin agua libre superficial
- 3) estado saturado y con agua superficial en movimiento, es decir, con filtración de agua a través de la grieta.

En seguida se analizan brevemente estas condiciones y los criterios de tratamiento que con frecuencia se emplean en cada caso. ⁽³⁾

a) Grietas en condición seca

Esta es una condición conveniente cuando se va a usar para sellar las grietas un material formulado para adherirse sobre concreto seco, como es el caso de la mayor parte de los selladores flexibles (masillas y termoplásticos bituminosos, elastómeros en general, etc.) Y de algunos selladores rígidos, como las resinas poliéster y muchas de las resinas epóxicas. Sin embargo, la condición seca no es conveniente cuando el tratamiento de las grietas debe hacerse con una mezcla a base de cemento Portland, ya que en este caso la absorción de agua por parte del concreto endurecido puede incrementar la concentración plástica de la mezcla del relleno, sea ésta lechada, mortero o concreto, ya que puede perder su efectividad. ⁽³⁾

Consecuentemente, cuando el concreto en el interior de la grieta se encuentra seco y el tratamiento va a efectuarse con un material adherente en seco, como la resina, se recomienda tomar la precaución de eliminar el polvo, suelto o adherido, que pueda afectar la adhesión del sellador. Para lograrlo, se emplean comúnmente dos medios. ⁽³⁾

- 1) inyectar aire seco a presión a través de las grietas, de modo que se realce la expulsión del polvo interior suelto.
- 2) Inyectar agua a presión en las grietas hasta que el agua salga limpia y, a continuación, inyectar aire seco o bien dejar el tiempo necesario para que el concreto seque por evaporación. Cuando no se dispone de mucho tiempo para hacer la reparación, el primer medio es el indicado.

Si el tratamiento va a realizarse con una mezcla a base de cemento Portland, hay que procurar que el concreto adquiera una condición húmeda, sin agua limpia superficial. Para ello, el segundo medio anterior es el indicado, es decir, inyectar a presión en las grietas y después eliminar el agua libre excedente, ya sea por inyección de aire o por evaporación natural. ⁽³⁾

b) Grietas en condición húmeda

Es necesario poner el concreto en la condición apropiada a la naturaleza y las características del material de sellado que vaya a utilizarse. Si éste requiere adherirse sobre concreto seco, el procedimiento indicado es inyectarse seco,

con lo que no sólo se seca completamente el concreto sino que limpia el interior de la grieta. Si el material de relleno es una mezcla con cemento Portland, la medida apropiada es aplicar la inyección de aire sólo lo necesario para dejar el concreto húmedo, sin agua libre. Por último, si se pretende por requerimientos estructurales sellar la grieta con una resina epóxica y no se logra secar el concreto por circunstancias especiales, entonces debe consultarse al fabricante para usar una resina adecuada para adherir sobre concreto húmedo. ⁽³⁾

c) Grietas con agua en movimiento

En muchas estructuras de concreto que forman parte de obras hidráulicas, el problema del tratamiento de grietas se complica por la presencia de agua en movimiento, ya sea a través de las grietas o sobre la superficie donde se localizan las grietas. La experiencia ha demostrado que resulta muy difícil efectuar un buen sellado en estas condiciones, a menos que se impida o se reduzca a un grado mínimo el acceso de agua en movimiento al lugar donde debe adherirse el sellador definitivo. Para lograrlo existen dos posibilidades. ⁽³⁾

1) obstruir las vías de acceso de agua

2) desviar el agua fuera de la zona de tratamiento

- Obstrucción del agua

Para obstruir las vías por donde emana el agua, suelen emplearse tres procedimientos, inyección de productos químicos, obturación con pasta o mortero de cemento Portland mezclado con un aditivo de fraguado muy rápido y calafateo con lana mineral. ⁽³⁾

Para la inyección de productos químicos debe perforarse barrenos de unos 10 a 15 mm de diámetro a través del concreto, para inyectar a presión por ellos un monómero de dos componentes de muy baja viscosidad (2 cent poises), que endurece conforme se polimeriza. Si la estructura de concreto no es muy gruesa (un muro, por ejemplo), las perforaciones pueden hacerse de modo que atraviesen todo el espesor del concreto, hasta desembocar en el terreno de contacto en la vecindad del sitio donde surge el agua. De esta manera, al inyectar el monómero con una presión suficiente puede obstruirse la filtración del agua en su origen. ⁽³⁾

Si la estructura es demasiado gruesa y esto no es posible, entonces los barrenos pueden hacerse inclinados, partiendo de la superficie del concreto a una distancia de la grieta tal, que ésta sea interceptada a una profundidad del orden de 30 cm; en este caso, el monómero inyectado a presión por las perforaciones penetra en la grieta desplazando al agua y obstruyéndola. Debe considerarse que estos productos químicos sólo producen un sellado permanente si se encuentran en condiciones de saturación continua, pues al secar pierden propiedades. Debido a ello, es conveniente que el sellado definitivo de la grieta se realice con otro sellador, flexible o rígido según se

requiera, apropiado para adherirse en condiciones húmedas y para soportar cambios de humedad. ⁽³⁾

Hay aditivos químicos que reproducen un fraguado muy rápido de la pasta de cemento Portland, que puede ser controlable desde unos cuantos segundos hasta varios minutos, según se necesite. En los casos en que el agua brota por la grieta, es posible actuarla superficialmente con una pasta o mortero de cemento Portland, mezclado con un aditivo que produzca un fraguado muy rápido. Para ello, es conveniente abrir una ranura de sección rectangular a lo largo de la grieta, con ancho suficiente para introducir rápidamente un mortero de consistencia pastosa hecho con una parte de cemento Portland, una parte de arena y el aditivo en cantidad suficiente para producir un fraguado casi instantáneo. La colocación de este mortero debe hacerse con la mano protegida con guante de hule, debido al carácter cáustico del aditivo. Si la presión del agua es demasiado alta y tiende a expulsar el mortero antes de su endurecimiento, pueden colocarse pequeños tubos metálicos con rosca en el extremo (nipples) en puntos localizados de la grieta hacia donde convenga canalizar y concentrar el agua; de esta manera, después que se ha obturado toda la grieta con mortero y el agua sale únicamente por los tubos, es posible cerrar éstos con una tapa ciega. Para evitar el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo, es conveniente seleccionar un aditivo exento de cloruros. ⁽³⁾

Un trabajo similar al anterior puede hacerse calafateando la grieta con la lana mineral o estopa de grafito empacada a presión con la sola diferencia de que la ranura a lo largo de la grieta debe hacerse con sección en forma de “V” para facilitar la introducción del material de relleno con la ayuda de un pisón. El nivel superior del relleno debe quedar de 10 a 15 mm abajo de la superficie del concreto, para la colocación del sellador definitivo. ⁽³⁾

- Desvío del agua

Si hay modo de tener acceso a la parte posterior de la estructura donde se origina la filtración del agua, puede intentarse desviarla por medio de drenes que descarguen fuera de la zona de tratamiento. En el caso del agua que se desplaza sobre la superficie del concreto donde se localizan las grietas, su desvío puede hacerse construyendo bordos provisionales con el mortero de cemento de fraguado muy rápido. Después de hecho el desvío, el tratamiento debe hacerse como el caso de grietas en condición húmeda, y de acuerdo con la clase de sellador que se haya decidido emplear. ⁽³⁾

Casos especiales de reparación de grietas

Se consideran como casos especiales de reparación los siguientes tipos de grietas:

- a) transversales en tuberías
- b) de origen estructural
- c) del concreto plástico
- d) de contracción térmica y por secado
- e) por corrosión del acero

- f) por reacciones químicas cemento-agregado
- g) por deficiencias constructivas

1) Grietas transversales en tuberías y conductos cerrados

Las grandes tuberías y conductos cerrados de concreto, son elementos estructurales propensos a experimentar agrietamientos transversales (circunferenciales) producidos por cambio de temperatura o contracción por secado. Estas grietas deben considerarse y tratarse como grietas activas, ya que por sus condiciones de servicio estos elementos están sometidos a continuos cambios volumétricos; en consecuencia, su reparación debe hacerse con un material flexible. ⁽³⁾

El procedimiento especificado para su ejecución es:

- Recortar en la superficie interior del conducto una ranura circunferencial siguiendo la grieta, con un taladro con punta de diente de sierra para lograr una ranura precisa con bordes agudos y bien perfilados. Esta ranura debe tener aproximadamente un ancho de 13 mm y una profundidad de 60 mm.
- Lavar perfectamente el interior de la ranura y después secarlo con chiflón de aire. Para proseguir, el concreto puede estar húmedo, aunque debe hallarse superficialmente seco. Si hay filtración de agua desde el exterior a través de la grieta, ésta puede calafatearse con lana mineral.
- Introducir en el fondo de la ranura una cinta de lana mineral de 6 mm de espesor y apisonarla perfectamente contra el fondo.
- Introducir en la ranura, circunferencialmente, un cordón preformado de “mástique”, hasta apretarlo firmemente contra la lana mineral. Este cordón de mástique es como el que se utiliza para sellar la junta entre la espiga y la campana en tuberías prefabricadas (tipo fierro fundido).
- Introducir en la ranura, del mismo modo, un cordón de asbesto trenzado de 16 mm de diámetro, compactándolo enérgicamente con pisón de mano o neumático para que presione con firmeza sobre el mástique previamente colocado.

Terminar introduciendo en la ranura un segundo cordón del mismo mástique de 19 mm de diámetro, apretándolo contra el cordón de asbesto, para finalizar alisándolo y enrasándolo con la superficie interior del conducto. ⁽³⁾

2) Grietas de origen estructural

Ante la presencia de grietas en una estructura, el primer paso debe ser tratar de definir su origen genérico, es decir, si corresponden a grietas intrínsecas o grietas estructurales, suponiendo que después de realizar el examen correspondiente se concluye que su origen es estructural, el siguiente paso consiste en determinar su origen específico, es decir, la causa externa que provocó los esfuerzos que ocasionaron las grietas. Paralelamente, debe indagarse si las grietas son activas o inactivas; para ellos pueden colocarse

“testigos”. Si las grietas se muestran inactivas o “durmientes”, puede suponerse que el fenómeno causante alcanzó un estado de equilibrio, temporal o permanente, que también conviene averiguar. Si las grietas se manifiestan activas o “vivas” puede deberse a cierta inestabilidad estructural o bien, a cambios volumétricos del concreto propiciados por excesivas variaciones de temperatura y / o de humedad. ⁽³⁾

En este momento es conveniente consultar el caso con el proyectista de la estructura, a fin de que contribuya a dilucidar esta última duda y, en caso de existir inestabilidad estructural, recomiende las medidas correctivas adecuadas para convertir las grietas activas en inactivas. Así mismo, debe señalar el objetivo fundamental que debe perseguirse al hacer la reparación de las grietas; es decir, si el restablecimiento de la capacidad estructural del concreto es un requisito indispensable o resulta suficiente taparlas con fines de impermeabilidad, durabilidad o simplemente estéticos. Si es indispensable restablecer la capacidad estructural, las grietas deben sellarse en toda su profundidad con un material rígido o semirígido, con características y propiedades adecuadas. Si basta con cubrirlas, entonces las grietas pueden taparse superficialmente con un sellador rígido o flexible, o con un recubrimiento aplicado en la superficie del concreto. ⁽³⁾

Considerando el primer caso, que es el más importante y exigente, la selección del material rígido o semirrígido debe hacerse con base en el grado de restructuración recomendado por el proyectista, de acuerdo con el estado de humedad y la abertura de las grietas. Si no es un requisito esencial lograr una adhesión completa del nuevo material con el concreto antiguo, como en caso en el que prevalecen los esfuerzos de compresión, entonces la grieta puede rellenarse con una mezcla a base de cemento Portland; si por lo contrario, se requiere suficiente adherencia para resistir esfuerzos de tensión a través de la grieta, entonces es necesario utilizar en el relleno un compuesto epóxico o una resina poliéster en condiciones secas de servicio. En ambos casos, las características del material de relleno y el procedimiento de sellado deben guardar relación con la abertura de las grietas. ⁽³⁾



Figura 45 Escaneo de Armaduras

Obtenido en www.rfa.cl/images/repes/image

- Grietas finas

Las grietas comienzan a ser visibles a simple vista cuando su abertura es del orden de 0.1 mm, pero normalmente se les empieza a conceder importancia cuando alcanzan aberturas entre 0.1 y 0.4 milímetros. En términos prácticos, las grietas se consideran finas en tanto su abertura no exceda 1 mm, aproximadamente. ⁽³⁾

Para sellar estructuralmente una grieta o un conjunto de grietas con aberturas menores de 1 mm, es necesario introducir a presión un fluido de muy baja viscosidad que no contenga partículas en suspensión con dimensiones mayores de la quinta parte de la abertura. Tomando en cuenta que el cemento Portland contiene partículas máximas del orden de 100 μ m (0.1 mm), de inyección, a grietas con aberturas mayores de 0.5 mm es limitada; en la práctica, se ha observado que el alcance de penetración de las lechadas de cemento en grietas de cemento finas es muy restringido, por lo que para sellar grietas menores de 1 mm se prefiere usar resinas epóxicas de baja viscosidad o resinas poliéster si el concreto permanece en condición seca de servicio. ⁽³⁾

La primera actividad debe ser perforar barrenos con diámetro entre 6 y 10 milímetros y una profundidad de 2 a 3 milímetros, espaciados uniformemente a lo largo de la grieta, con una separación que no exceda de dos tercios de la profundidad de la grieta o de 60 cm. Después deben lavarse las grietas internamente, aplicando en los barrenos un chorro de agua a presión, comenzando desde el punto más alto de la grieta y continuando en orden descendente para facilitar la expulsión de los residuos interiores. ⁽³⁾

Cuando el agua acabe de escurrir, en cada barreno debe insertarse una boquilla de plástico con diámetro ajustado al del barreno, provista con una válvula de retención (check), debe ponerse especial cuidado en no obstruir la comunicación entre la grieta con una pasta epóxica, dejando unos pequeños Orificios de ventilación a cada 15 cm, obturando también el espacio circunferencial alrededor de cada boquilla; así deben terminar los preparativos para la inyección del lado accesible de la estructura. Si el lado opuesto también es accesible o puede descubrirse y si la grieta atraviesa de lado a lado, ésta debe taparse con la misma pasta epóxica para evitar que la resina inyectada escape hacia fuera por el otro lado. ⁽³⁾

El proceso de inyección se realiza introduciendo la resina a presión en el espacio de las grietas por conducto de las boquillas. Debido a que se trata de un producto integrado por dos componentes (resina y endurecedor) que deben mezclarse previamente y que una vez mezclados, deben aplicarse con rapidez, es necesario emplear un equipo idóneo para su dosificación, mezclado e inyección. El equipo recomendable son dos recipientes independientes, donde la resina y el endurecedor se mantienen separados y en continua agitación,

desde donde se bombean ambos componentes en proporción preestablecida hacia un dispositivo receptor en el que se mezclan enérgicamente y salen a presión como un solo fluido a través de un tubo inyector. ⁽³⁾

En el caso de superficies verticales o inclinadas, el tubo inyector se acopla a la boquilla aplicando la resina a partir del punto más bajo de la grieta y continuando en sentido ascendente conforme vaya apareciendo resina en la boquilla inmediata superior hasta llenar todo el espacio confinado dentro de la grieta. En superficies horizontales, el proceso de inyección puede iniciarse en cualquiera de los extremos de la grieta, siguiendo un orden continuo de aplicación del tubo inyector en un solo sentido, sólo se cambia de boquilla hasta que aparezca resina en la boquilla que la sigue. Con este procedimiento se trata de evitar que quede aire atrapado dentro de la grieta. ⁽³⁾

La presión de inyección, que es regulable, debe mantenerse lo más baja posible para evitar que una súbita obstrucción en el proceso eleve demasiado la presión y pueda causar daño a la estructura. Para ello, debe ejercerse un control permanente de la presión durante la inyección, de manera que ésta pueda suspenderse cuando sobrepase un límite prefijado (del orden de 5 kg/cm²); esto sucede muchas veces por obstrucción debida al endurecimiento de resina en el dispositivo de mezclado e inyección. En este caso, debe interrumpirse el proceso para lavar este dispositivo por dentro con un solvente adecuado, y reanudarse la inyección en la misma boquilla o en la inmediata siguiente. ⁽³⁾

Es conveniente elegir la resina adecuada, no sólo en cuanto a su viscosidad sino también a sus propiedades de adherencia sobre concreto seco o húmedo, según el estado en que éste se encuentre, y su flexibilidad después de endurecer cuando se esperan algunos cambios de volumen o deformaciones en la estructura. En otras palabras, existen resinas con diversa viscosidad, desde muy fluida (casi como agua) hasta de consistencia pastosa; resinas que pueden adherirse sobre concreto seco, concreto húmedo e incluso con agua libre en la superficie; y resinas que al endurecer pueden ser rígidas o con cierta flexibilidad que les permite absorber algunos movimientos. ⁽³⁾

En los casos en que sólo es accesible un lado de la estructura y, en consecuencia, no es posible tapar la grieta en el lado posterior, se corre el riesgo de desperdiciar la resina que después de atravesar el espesor de concreto se aloje en el terreno de contacto sin beneficio alguno para la estructura. Para disminuir este riesgo, existe la posibilidad de emplear una resina epóxica con propiedades de licuación que le permitan dejar de fluir cuando se suspenda la presión de inyectado. ⁽³⁾

Una vez concluida la inyección se recortan las boquillas y se remueve la cinta superficial de pasta epóxica endurecida; para ello, puede emplearse un esmeril con piedra de carborundo. Si la apariencia del concreto es importante, puede aplicarse una pintura que oculte la grieta reparada. El endurecimiento de la resina suele ocurrir en cuestión de minutos o de horas, aunque la adquisición

de todas sus propiedades puede requerir entre uno y siete días en condiciones ordinarias. Tomando esto en cuenta es prudente evitar el trabajo normal de la estructura antes de que transcurra una semana. Así mismo, cuando se produzcan bajas temperaturas ambientales deben tomarse medidas para mantener protegida la zona reparada, ya que un fuerte descenso en la temperatura de curado puede hacer mucho más lento el proceso de endurecimiento y adquisición de propiedades de la resina. De cualquier manera, siempre es deseable hacer pruebas para verificar la evolución en el comportamiento de la resina, mediante el ensaye a compresión a diversas edades de especímenes cúbicos de 5 cm elaborados y conservados en las mismas condiciones de la reparación. ⁽³⁾

Es pertinente hacer notar que las reparaciones realizadas mediante inyecciones de esta naturaleza son trabajos especializados que no admiten improvisaciones; por lo que requieren el uso de equipo adecuado y la participación de personal con experiencia. Debido a ello, es recomendable acudir a empresas especializadas para su ejecución cuando sea necesario. ⁽³⁾

- Grietas medianas

Se consideran grietas de aberturas medianas a las intermedias entre las muy finas cuya estrechez sólo admite la penetración de resinas de baja viscosidad y las muy anchas donde es posible introducir mortero o concreto. De manera un tanto arbitraria, puede considerarse entonces que las grietas medianas corresponden al intervalo entre 1 y 6 milímetros, aproximadamente. ⁽³⁾

Para reparar estructuralmente grietas con aberturas en el intervalo de 1 a 6 milímetros, existen varias opciones que dependen de factores tales como el grado de restructuración requerida, la condición de humedad del concreto, la posición de la superficie donde se localizan y su profundidad, si bien los materiales a elegir son básicamente dos: una resina epóxica o poliéster y una lechada de cemento Portland. ⁽³⁾

Como ya se mencionó, las resinas epóxicas o poliéster tienen cualidades para esta aplicación muy superiores a las de una lechada de cemento Portland, pero su costo unitario es también mucho más alto. Por esta razón, cuando la rehabilitación estructural tiene prioridad, se opta por una resina no obstante el costo; de no ser así puede considerarse utilización de una lechada de cemento. ⁽³⁾

Para mejorar las cualidades y el comportamiento de las mezclas a base de cemento Portland se ha logrado cierto éxito agregándoles látex, que es una dispersión coloidal en agua de una resina de hule sintético o natural que coagula en contacto con el aire. Se sabe que agregar látex al concreto convencional durante el mezclado, redundará en beneficio de su resistencia mecánica, de su flexibilidad, durabilidad y adhesividad, y de su resistencia a la abrasión y al impacto. ⁽³⁾

La condición de humedad actual y de servicio del concreto es un factor que también influye en la elección del material de reparación. Si el concreto se encuentra seco y va a permanecer en ese estado, es posible considerar el empleo de una resina poliéster, de lo contrario las opciones se reducen a una resina epóxica capaz de adherirse al concreto en presencia de humedad y una lechada de cemento Portland modificada con látex. ⁽³⁾

La influencia de la posición y la profundidad de las grietas son asimismo determinante. En las grietas de 1 a 6 milímetros de abertura localizadas sobre una superficie vertical o inclinada siempre resulta factible su inyección con una resina epóxica de viscosidad adecuada. Si las grietas en esta misma posición tienen aberturas entre 1 y 2 milímetros, y / o su profundidad excede de 2 m, puede haber duda de lograr un buen sellado de las lechadas de cemento inyectadas en superficies verticales o inclinadas conviene limitarla a grietas con aberturas de 2 mm y cuya profundidad no exceda de 2 m, debido a las irregularidades normales de las grietas en el concreto. ⁽³⁾

Cuando las grietas medianas se localizan en superficies horizontales o de poca inclinación existe la posibilidad de sellarlas por simple gravedad. Por ejemplo, para el rellenado por gravedad de grietas entre 1 y 6 milímetros de abertura, es factible lograr una buena penetración hasta profundidades del orden de 1 m si se utiliza una resina epóxica de baja viscosidad; pero si se emplea una lechada de cemento su cabal penetración por gravedad no puede asegurarse en grietas con aberturas menores de 3 mm, ni profundidades que excedan de unos 30 a 40 centímetros. En consecuencia, para el caso de superficies horizontales o de poca inclinación, si las grietas tiene entre 1 y 6 milímetros de abertura y menos de 1 m de profundidad es factible sellarlas por gravedad con una resina epóxica de baja viscosidad, pero si la profundidad es mayor o la grieta está en la parte inferior del techo, la resina debe inyectarse a presión como en el caso de grietas finas. Si las grietas presentan aberturas entre 3 y 6 milímetros y su profundidad es menor de unos 35 cm, entonces también resulta factible sellarlas por gravedad con el uso de una lechada de cemento Portland modificada con látex. Esta misma lechada puede utilizarse en grietas con aberturas entre 2 y 6 milímetros y profundidades hasta de 2 m, si se le inyecta a presión. ⁽³⁾

La técnica y los equipos aplicables para la dosificación, mezclado e inyección de estas lechadas no refieren sustancialmente de los que se acostumbran emplear en los trabajos ordinarios de inyección para obras de diferente género, y los preparativos referentes al tapado superficial de la grieta y la colocación de boquillas deben ser similares a los descritos para la inyección con resinas epóxicas. ⁽³⁾

Cuando se pretende introducir lechadas de cemento por gravedad, conviene emplear el mismo equipo de dosificación y mezclado, omitiendo la inyección a presión, con un equipo idóneo de alta velocidad y mantener la lechada en continua agitación para prevenir su sedimentación antes de vaciarla en la grieta. ⁽³⁾

Considerando que los componentes básicos de una lechada son el agua y el cemento, su relación resulta comprometida con la fluidez que se requiere dar para que penetre en la grieta, lo que resulta, entonces, en que la resistencia de la lechada endurecida está en función de dicha fluidez. ⁽³⁾

Puede ocurrir que para introducir la lechada en grietas estrechas, sea necesario hacerla muy fluida y que, en consecuencia, su resistencia resulta inferior a la requerida. En tales casos es posible incrementar la fluidez, sin aumentar el agua, mediante la incorporación a la mezcla de un aditivo fluidizante o dispersante específicamente diseñado para lechadas de inyección, con lo que la resina no debe afectarse. ⁽³⁾

Cuando en los trabajos de reparación se utilizan mezclas a base de cemento Portland, es un requisito indispensable suministrarles un buen curado. Para ello, la zona reparada debe mantenerse completamente húmeda durante un periodo de por lo menos 4 días. En el caso de reparación de grietas con lechadas de cemento, este requisito de curado es aún más importante porque la tendencia de las lechadas a contraerse es mayor. ⁽³⁾

Finalmente, un aspecto que conviene tener presente para la elección del material de reparación es correspondiente al tiempo de espera que se necesita para poner en orden en servicio la zona reparada. En el caso de una resina epóxica el tiempo de espera puede fluctuar entre uno y siete días, dependiendo de la trascendencia de la grieta y las características de la grieta y de las características de la resina, en tanto que con una lechada suele ser de dos a cuatro semanas. ⁽³⁾

- Grietas amplias

De acuerdo con el intervalo dimensional asignado a las grietas medianas ya descritas, las grietas con abertura mayor de 6 mm se designan grietas amplias y corresponden a verdaderas fracturas. ⁽³⁾

Para justificar la frontera de 6 mm entre las grietas medianas y amplias, hay que considerar un cambio en los materiales que pueden utilizarse en ambos casos. Como ya se mencionó, en las grietas medianas sólo es factible hacer un Sellado interno con una resina o una lechada de cemento; sin embargo, cuando la abertura aumenta, ambas opciones presentan inconvenientes: en el caso de la resina significa mayor costo y en el de la lechada, mayores contracciones. En tal situación, la solución consiste en incorporar a la resina y la lechada un agregado con partículas de tamaño adecuado a la abertura de la grieta. El agregado más fino que normalmente se utiliza en esta aplicación es la arena pasa por la malla núm. 16, cuya abertura es de 1.2 mm; si se considera cinco veces este tamaño de partícula, resulta que la mayor abertura de grieta en que puede utilizarse esta arena es igual que 6 milímetros. ⁽³⁾

Cuando se incorpora arena a una resina epóxica se produce un mortero epóxico y cuando la incorporación se hace a una lechada, el producto es un mortero convencional de cemento Portland. De igual modo, le incorpora grava

puede producirse un concreto epóxico o un concreto de cemento Portland. Cuando el aglutinante del mortero o concreto es una resina epóxica, la resistencia del producto es determinada por la que alcance la resina que se utilice, es decir, se trata de una propiedad regulada por el fabricante de la resina. En cemento Portland, el usuario puede regular la resistencia de acuerdo con la relación agua/cemento que utilice. ⁽³⁾

Para definir el material que conviene utilizar en el relleno de una grieta, prevalecen los mismos conceptos expuestos para las grietas medianas. Es decir, en este caso, las opciones son un mortero o concreto de cemento Portland, con o sin látex. Para grietas amplias con aberturas comprendidas entre 6 y 25 milímetros aproximadamente, el relleno puede hacerse con un mortero cuya arena posea un tamaño máximo de partícula que no exceda la quinta parte de la abertura. Para grietas muy amplias con aberturas mayores de 25 mm es conveniente emplear un concreto fino, agregando al mortero gravilla cuyo tamaño máximo no exceda la cuarta parte de la abertura. ⁽³⁾

En los casos en que el material utilizable sea un mortero de cemento Portland, existe la opción de emplear un mortero sin contracción pre dosificado en seco, que es un producto comercial formulado esencialmente a base de cemento Portland, arena sílica fina y un aditivo estabilizador de volumen, al cual sólo debe añadirse agua de mezclado para utilizarlo. La ventaja de estos morteros es que pueden elaborarse con bastante fluidez sin que manifieste contracción y que tienen muy buena adherencia con el concreto antiguo. También es factible agregar gravilla a este mortero, cuando la abertura de la grieta lo permita. Considerando estas ventajas, no se duda en recomendar este tipo de material, en forma de mortero o de concreto, cuando el empleo de una mezcla epóxica no sea indispensable. Tomando en consideración que estos morteros sin contracción son productos comerciales sujetos a fluctuaciones de calidad, también es recomendable verificar que cumplan con los requisitos de calidad aplicables. ⁽³⁾

La limpieza interior de las grietas es una condición necesaria, independientemente de que se utilice una mezcla epóxica o de cemento Portland. Para ello, un procedimiento eficaz es aplicar un chorro de agua a presión dirigido hacia el interior, partiendo del punto más alto de la grieta, si ésta se localiza en una superficie vertical o inclinada, o bien, desde uno de los extremos, si la superficie es horizontal. Para la aplicación de una mezcla epóxica, el concreto dentro de la grieta puede estar seco, húmedo o incluso con agua superficial, dependiendo de las características y propiedades de la resina que se aplique. En el caso de la aplicación de una mezcla a base de cemento Portland, el concreto debe estar húmedo pero sin agua superficial. ⁽³⁾

Para el relleno de grietas amplias en superficies verticales o inclinadas, es conveniente cimbrar la superficie de la grieta para confinar el espacio interior donde debe introducirse el mortero o concreto, realizando el cimbrado por tramos a partir del punto más bajo de la grieta. La compactación del material de relleno debe hacerse con una varilla de diámetro y longitud adecuados para su

introducción en la grieta y, cuando sea posible, también debe procurarse emplear un vibrador de inmersión de vástago delgado (tipo “lápiz”) para compactar por vibración la zona más superficial del relleno. ⁽³⁾

8.4 Reparación de concreto armado atacado por corrosión

De modo esquemático. El proceso de reparación de un pilar de concreto armado afectado por corrosión se resolvería en los siguientes pasos. ⁽⁶⁾

1. Analizar la seguridad del pilar y asegurar la estabilidad del mismo, apuntalando si es necesario las partes más débiles. Hay que tener en cuenta que picar las cuatro esquinas de un pilar con armaduras oxidadas puede reducir su resistencia entre un 20 y un 40 %. ⁽⁶⁾

2. Delimitar la zona dañada, sobre la que hay que proceder al picado. Puede haber un margen de exceso de unos 10 ó 15 cm a ambos lados. ⁽⁶⁾

3. Retirar el concreto dañado y descubrir las barras, de modo que se pueda proceder a su limpieza y a la eliminación de todo el óxido. ⁽⁶⁾

Puede procederse a aplicar sobre éstas una protección anticorrosiva y una capa de epoxi poliuretano elástico. Este absorberá futuras expansiones de las armaduras si suceden nuevas corrosiones, evitando de este modo que se rompan las esquinas reparadas.

En casos como éste, resulta además conveniente realizar un refuerzo mecánico del pilar. ⁽⁶⁾

5. Ha de descubrirse toda la sección y longitud afectada por la oxidación, si se decide dar un tratamiento de protección a las armaduras.

En el caso de que quede una delgada capa de óxido que resulta imposible eliminar, el material de protección debe ser un estabilizante de este óxido, consiguiendo con ello que la parte no atacada de la barra permanezca pasiva. ⁽⁶⁾

6. La reparación de las zonas picadas ha de hacerse en sucesivas capas con espesores de 2 ó 3 mm si la zona a reponer es muy amplia. ⁽⁶⁾

A continuación veremos un ejemplo en imágenes de reparación de una estructura dañada por efectos de corrosión. ⁽⁶⁾



Figura 46 Fotografías en las cuales se muestra la remoción de concreto, hasta descubrir las armaduras oxidadas

"Obtenido en [www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia de la edificación](http://www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia_de_la_edificaci3n)"



Figura 47 Limpieza de la estructura, para eliminar polvo y oxido, quedando al descubierto las armaduras para aplicar capa de imprimación

"obtenido en [www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia de la edificación](http://www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia_de_la_edificaci3n)"



Figura 48. Una vez saneadas las armaduras se protegerán con resinas tipo SIKATOP 100 epoxi
obtenido en [www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia de la edificación](http://www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia_de_la_edificacion)



Figura 49. Finalmente se realiza la reconstrucción de las partes reparadas
Obtenido en [www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia de la edificación](http://www.es.wikibooks.org/wiki/Patologia_de_la_edificacion)

Conclusiones

Como se pudo observar a lo largo de este trabajo existen varias patologías que se presentan en el concreto, algunas de ellas se pueden evitar desde el momento en que se esta elaborando en concreto hidráulico tomando en cuenta que los materiales empleados son un factor importante sin olvidar el factor del recurso humano que es quien elabora el concreto.

El conocimiento del origen de las patologías en concreto vistas en este trabajo nos pueden ayudar esencialmente para evitarlas, pues estos daños afectan en gran medida desde el punto de vista económico y también en lo constructivo ya que se puede perder un tiempo considerable en la reparación de los daños (cuando se producen durante la ejecución de la obra).

Los métodos de análisis no destructivos son muy importantes ya que se pueden realizar pruebas directamente a las estructuras sin dañar o modificar sus condiciones mecánicas y a partir de ahí conocer que tipo de daño presenta y la magnitud del mismo

También se pudo observar que el tipo de cemento que se va a emplear en la construcción de cualquier obra va a estar en función del tipo de clima que exista en la localidad de ejecución, pues de no hacerlo así el responsable de la obra estaría influyendo para que se propague un daño en la estructura. Así mismo el hecho de realizar inspecciones periódicas nos pueden ayudar a detectar a tiempo un posible daño en el concreto de manera que se le pueda dar un mantenimiento correctivo y evitar daños mayores en la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

1. **PATOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN 14.**
La corrosión de las armaduras en el concreto armado.
www.zonacentro.net/productos/construccion/patologias/pdf/Patologia
2. **MICROESTRUCTURA DEL CEMENTO.**
La microestructura del cemento durante la etapa de solidificación evoluciona
www.uprm.edu/LuisGodoy/courses/Materiales/Microestructura
3. **MANUAL DE OBRAS DE OBRAS CIVILES DE LA C. F. E.**
Subgerencia de Ingeniería Civil Año 1991
4. **GUÍA DEL USUARIO CEMEX CONCRETOS**
Año 2001
5. **PATOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN 48.**
Efectos de incendios en estructuras de concreto armado. Un incendio constituye una amenaza.
www.bomberojuarez.com/accesor/descar/patologia48.pdf
6. **PATOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN**
Reparación de armaduras con corrosión
www.es.wikibooks.org/wiki/Patología/Estructurasdehormigon
7. **DEFINICION DE PATOLOGIA**
www.es.wikibooks.org/wiki/Patología
8. **ENSAYO DE COMPRESIÓN DE UNA PROBETA CILÍNDRICA DE HORMIGÓN.**
En ingeniería, el ensayo de compresión es un ensayo técnico
www.es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compresión
9. **ANÁLISIS DE TOMOGRAFIA DEL CONCRETO**
www.cai.org.ar/dep_tecnico/comisiones/CTECO/trabajos/tomografia
10. **ESCLEROMETRO USO Y APLICACIONES**

www.pce-iberica.es
11. **EVALUACION DEL HORMIGÓN**
www.icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.do

12. EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN

Manuel Alejandro Jiraldo M./Jorge Iván Tobon 2006

www.Redalyc.org (la hemeroteca científica en línea)

13. ENSAYO DE COMPRESIÓN DE UNA PROBETA CILÍNDRICA DE HORMIGÓN.

En ingeniería, el ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar...
www.es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compresión

14. GECOR 8, EQUIPO PARA MEDIR LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO ARMADO (CATALOGO)

www.ndtjames.com/spanish/catalog/corrosionTesting/gecor8

15. HISTORIA DEL CEMENTO

www.es.wikipedia.org