

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**DETECCIÓN, TRATAMIENTO Y PREVENCIÓN DE PATOLOGÍAS  
EN SISTEMAS DE CONCRETO ESTRUCTURAL UTILIZADOS EN  
INFRAESTRUCTURA INDUSTRIAL**

INFORME DE TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

PREPARADO POR  
ELIZABETH AVENDAÑO RODRÍGUEZ

MAYO 2006

Avendaño Rodríguez, Elizabeth

**Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial.**

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil, San José, C.R.:

**E. Avendaño R., 2006**

133h:ils. – 27 refs.

**RESUMEN**

Las patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial son sumamente frecuentes, y por lo tanto su temprana detección, tratamiento y prevención es de especial interés, debido a los altos costos involucrados y a las consecuencias negativas que se presentan durante el servicio de estos sistemas. De igual forma, evitar las patologías mediante adecuados métodos de diseño por durabilidad presenta grandes ventajas y ahorros.

La metodología de esta investigación se basa en el estudio de documentos y normativa internacional relacionados con los temas de durabilidad, diagnóstico de patologías, rehabilitación y mantenimiento de estructuras. Se plantea un procedimiento sistematizado de Tres Niveles, que sirve de guía práctica y detallada para el ingeniero en proyectos industriales. Aún así, los conceptos utilizados son igualmente aplicables y adaptables a todo tipo de estructuras de concreto estructural. El procedimiento de Tres Niveles propuesto es validado mediante su aplicación en el estudio de una losa de concreto reforzado, la cual forma parte del piso de un sistema de cámaras de congelación industrial.

Al realizar la investigación bibliográfica, y la validación de campo, se encontró que en Costa Rica no existe normativa que regule el diseño, reparación y mantenimiento de las estructuras por su durabilidad. Además, no se cuenta con equipo de ensayo ni laboratorios de materiales especializados para realizar pruebas, que caractericen las propiedades del concreto asociadas con su desempeño a través del paso del tiempo. No existe conciencia en los profesionales en el área, con respecto a temas de durabilidad.

Por su organización y claridad de resultados se recomienda la utilización del método propuesto de Tres Niveles para el análisis, evaluación, diseño, reparación y mantenimiento de estructuras. Asimismo, trabajar en la normalización de los métodos de diseño, reparación y mantenimiento por durabilidad, es un tema urgente. E.A.R.

**CONCRETO; DURABILIDAD; PATOLOGÍA DEL CONCRETO; DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS; REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS; MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS.**

Ing. Rubén Salas, Ph.D.  
Escuela de Ingeniería Civil

## DEDICATORIA

*A mi padre, por ser el ángel que ilumina mi camino y que me impulsa a luchar por mis sueños.*

*A mi madre, por ser mi ejemplo de coraje y entereza en cualquier circunstancia.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A Jose, por estar siempre presente en todo momento.*

*A mis hermanos, en especial a Sonia mi mejor amiga.*

*A Rubén Salas por su ejemplo, apoyo, confianza y sus enseñanzas.*

*A Javier Páez por su interés y sus valiosas recomendaciones.*

*A Alejandro Navas por sus aportes.*

## **COMITÉ ASESOR**

Director: Ing. Rubén Salas, Ph.D.

Asesor: Ing. Alejandro Navas.

Asesor: Ing. Javier Páez.

## ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1 .....	11
INTRODUCCIÓN .....	11
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo General.....	12
2.2. Objetivos Específicos.....	12
3. ALCANCE .....	13
4. LIMITACIONES.....	14
CAPITULO 2 .....	16
MARCO TEORICO .....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. CONCEPTOS GENERALES.....	16
2.1. Durabilidad.....	16
2.2. Patología Estructural .....	19
3. PATOLOGÍAS DEL CONCRETO ESTRUCTURAL.....	21
3.1. Clasificación de las patologías según la etapa del proyecto .....	21
3.1.1. Patologías durante la etapa de diseño.....	21
3.1.2. Patologías durante la etapa de construcción.....	22
3.1.3. Patologías durante el período de operación.....	23
3.2. Clasificación de las patologías según el origen del agente causante .....	24
3.2.1. Agentes Externos .....	25
1. Químicos .....	25
a) Ataque de ácidos.....	26
b) Corrosión del acero de refuerzo.....	28
c) Ataque de sulfatos .....	33
d) Carbonatación.....	34
2. Mecánicos.....	36
a) Sobrecargas.....	37
b) Impactos y vibración .....	39
c) Abrasión .....	39
3. Físicos .....	40
a) Fisuras por cambios de humedad .....	40
b) Fisuras por cambios de temperatura.....	41
4. Biológicos .....	43
3.2.2. Agentes Internos.....	46
Álcali – Sílice .....	47
Álcali – Carbonato .....	48
c) Álcali – Silicato .....	48
2. Formación de etringita diferida (FED) .....	48
3. Contracción por secado.....	48
CAPITULO 3 .....	50
DETECCIÓN Y TRATAMIENTO DE PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS EN SERVICIO.....	50
1. INTRODUCCIÓN.....	50
2. Diagnóstico (Método de tres niveles) .....	50
2.1. Nivel 1: Análisis no destructivo .....	51
1. Paso 1: Recopilación de información .....	52

Información general .....	52
Características del medio ambiente .....	52
Información del diseño original del proyecto .....	53
Información de los materiales y proceso constructivo utilizados .....	53
Historial de servicio .....	53
2. Paso 2: Inspección de la estructura .....	54
Definición de recursos .....	54
Inspección .....	54
Mediciones y exploración no destructiva .....	55
3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura .....	58
2.2. Nivel 2: Análisis destructivo .....	58
1. Paso 1: Definición de pruebas a realizar y recolección de muestras en sitio .....	59
2. Paso 2: Ensayos y pruebas de laboratorio.....	59
3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura .....	61
2.3. Nivel 3: Análisis de laboratorio y matemáticos especializados .....	62
3. Diseño correctivo por durabilidad .....	62
3.1. Periodo de servicio de una estructura existente .....	62
3.2. Especificaciones de diseño por durabilidad .....	63
1. Especificaciones generales para el diseño de mezclas de concreto .....	64
2. Especificaciones para deterioros provocados por agentes químicos .....	65
Ataque de ácidos.....	65
Corrosión del acero de refuerzo .....	66
Ataque de sulfatos .....	66
Carbonatación.....	67
3. Especificaciones para deterioros provocados por agentes mecánicos.....	67
Sobrecargas.....	67
Impactos y vibración .....	68
Abrasión .....	68
4. Especificaciones para deterioros provocados por agentes físicos .....	69
Fisuras por cambios de humedad .....	69
Fisuras por cambios de temperatura.....	69
5. Especificaciones para deterioros provocados por agentes biológicos.....	70
6. Especificaciones para deterioros provocados por la reacción álcali – agregado (RAA).....	71
7. Especificaciones para evitar la formación de etringita diferida (FED).....	71
8. Especificaciones para controlar la contracción por secado.....	72
4. Sistema de reparación .....	72
4.1. Paso 1: Determinación de las bases de diseño (BDD) .....	74
4.2. Paso 2: Diseño del sistema de reparación.....	75
1. Propiedades del material .....	75
2. Selección de materiales de reparación .....	77
3. Preparación de superficie .....	79
4.3. Paso 3: Planos constructivos y especificaciones .....	83
1. Planos constructivos.....	83
2. Especificaciones de diseño.....	83
4.4. Paso 4: Consecución del diseño .....	83
1. Selección del contratista.....	83
2. Ejecución de la reparación.....	84

5. Control de calidad del proceso de reparación .....	86
5.1. Control del concreto en estado fresco .....	86
5.2. Control de la colocación y compactación del concreto .....	86
5.3. Control de calidad por medio de pruebas y ensayos .....	87
6. Mantenimiento y protección .....	88
6.1. Protección contra agentes químicos .....	89
1. Ácidos .....	89
2. Corrosión del acero de refuerzo .....	89
3. Ataque de sulfatos .....	90
4. Carbonatación .....	90
6.2. Protección contra agentes mecánicos .....	91
1. Abrasión .....	91
6.3. Protección contra agentes físicos .....	91
1. Cambios de humedad .....	91
2. Cambios de temperatura .....	91
6.4. Protección contra agentes biológicos .....	92
CAPITULO 4 .....	93
PREVENCIÓN DE PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS NUEVAS .....	93
1. INTRODUCCIÓN .....	93
2. Diseño preventivo por durabilidad .....	93
2.1. Vida útil de servicio de una estructura nueva .....	93
2.2. Especificaciones de diseño por durabilidad .....	94
3. Control de calidad del proceso constructivo .....	96
4. Protección de las estructuras nuevas .....	96
4.1. Protección contra agentes químicos .....	96
1. Ácidos .....	96
2. Corrosión del acero de refuerzo .....	96
3. Ataque de sulfatos .....	97
4. Carbonatación .....	97
4.2. Protección contra agentes mecánicos .....	97
1. Abrasión .....	97
4.3. Protección contra agentes físicos .....	98
1. Cambios de humedad .....	98
2. Cambios de temperatura .....	98
4.4. Protección contra agentes biológicos .....	98
CAPITULO 5 .....	99
CASO DE ESTUDIO: LOSA DE PISO DE CAMARAS DE CONGELACIÓN INDUSTRIAL .....	99
1. INTRODUCCIÓN .....	99
2. Diagnóstico (Método de tres niveles) .....	99
2.1. Nivel 1: Análisis no destructivo .....	100
1. Paso 1: Recopilación de información .....	100
Información general .....	100
Características del medio ambiente .....	100
Información del diseño original del proyecto .....	101
Información de los materiales y proceso constructivo utilizados .....	102
Historial de servicio .....	102
2. Paso 2: Inspección de la estructura .....	103
Definición de recursos .....	103



Inspección .....	103
Mediciones y exploración no destructiva .....	107
3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura .....	108
2.2. Nivel 2: Análisis destructivo .....	110
1. Paso 1: Definición de pruebas a realizar y recolección de muestras en sitio .....	111
2. Paso 2: Ensayos y pruebas de laboratorio.....	111
3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura .....	111
3. Diseño correctivo por durabilidad .....	112
3.1. Periodo de servicio de la losa de piso de las cámaras de congelación .....	112
3.2. Especificaciones de diseño por durabilidad para acciones provocadas por agentes físicos (el caso de hielo – deshielo) .....	113
4. Sistema de reparación .....	113
4.1. Paso 1: Determinación de las bases de diseño (BDD) .....	113
4.2. Paso 2: Diseño del sistema de reparación.....	115
1. Propiedades del material .....	115
2. Selección de materiales de reparación .....	116
3. Preparación de superficie .....	116
4.3. Paso 3: Planos constructivos y especificaciones .....	116
1. Planos constructivos.....	116
2. Especificaciones de diseño.....	116
4.4. Paso 4: Consecución del diseño .....	117
1. Selección del contratista .....	117
2. Ejecución de la reparación.....	117
5. Control de calidad del proceso constructivo.....	122
5.1. Control del concreto en estado fresco .....	122
5.2. Control de la colocación y compactación del concreto .....	126
5.3. Control de calidad por medio de pruebas y ensayos .....	126
6. Mantenimiento y protección .....	126
CAPITULO 6 .....	128
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
1. CONCLUSIONES .....	128
2. RECOMENDACIONES .....	129
REFERENCIAS BIBIOGRAFICAS.....	131
APÉNDICES .....	134
1. INFORME DEL ENSAYO DE LOS NÚCLEOS DE CONCRETO .....	135
2. PLANOS CONSTRUCTIVOS DE LA REPARACIÓN.....	136
3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A LAS CILINDROS Y VIGAS .....	137
4. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE MEZCLA .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ley de evolución de costos (Ley de Sitter) .....	18
Figura 2.2. Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural.....	20
Figura 2.3. Clasificación de patologías según etapa de origen .....	21
Figura 2.4. Clasificación de patologías según el origen del agente causante.....	25
Figura 2.5. Esquema de deterioro del concreto causado por los ácidos.....	26
Figura 2.6. Esquema de deterioro provocado por la corrosión.....	30
Figura 2.7. Ejemplo de corrosión galvánica en el concreto .....	31
Figura 2.8. Tabla de actividad de los metales .....	32
Figura 2.9. Esquema de deterioro en concreto causado por el ataque de sulfatos .....	33
Figura 2.10. Esquema de deterioro causado por la carbonatación .....	35
Figura 2.11. Esquema de deterioro causado por cambios de humedad.....	41
Figura 2.12. Esquema de deterioro causado por ciclos de hielo y deshielo .....	42
Figura 2.13. Esquema temperatura, color y daño en el concreto por incendio.....	43
Figura 2.14. Esquema de deterioro causado por la RAA.....	47
Figura 2.15. Esquema de contracción por secado en el concreto.....	49
Figura 3.1. Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías en sistemas de concreto estructural en servicio .....	51
Figura 3.2. Nivel 1: Análisis no destructivo .....	52
Figura 3.3. Nivel 2: Análisis destructivo .....	58
Figura 3.4. Modelo de vida útil basado en el Modelo de Tutti.....	63
Figura 3.5. Esquema general de metodología de reparación .....	73
Figura 3.6. Erosión.....	80
Figura 3.7. Impacto .....	80
Figura 3.8. Pulverización .....	81
Figura 3.9. Presión expansiva .....	81
Figura 3.10. Perfiles de superficies de concreto (CSP) .....	82
Figura 3.11. Procedimiento general de reparación.....	85
Figura 3.12. Desempeño de estructuras de concreto con y sin mantenimiento.....	88
Figura 4.1. Interacción entre análisis estructural y análisis por durabilidad .....	95
Figura 5.1. Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías adaptado al caso de estudio de la losa de cámaras de congelación.....	99
Figura 5.2. Esquema de las cámaras de congelación .....	101
Figura 5.3. Esquema de la losa existente.....	102
Figura 5.4. Áreas con delaminación superficial.....	108
Figura 5.5. Nivel 2: Análisis destructivo aplicado al caso de estudio de la losa de cámaras de congelación .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ácidos y sustancias comunes perjudiciales para el concreto .....	27
Tabla 2.2. Esquema de grietas estructurales y características .....	37
Tabla 2.2. Esquema de grietas estructurales y características (Continuación).....	38
Tabla 2.3. Microorganismos y acciones sobre el concreto .....	45
Tabla 2.4. Algunos agregados y minerales potencialmente reactivos .....	46
Tabla 3.1. Procedimientos de evaluación de las propiedades del concreto .....	60
Tabla 3.1. Procedimientos de evaluación de las propiedades del concreto (Continuación).	61
Tabla 3.2. Algunos ejemplos de modelos especializados para el estudio de estructuras existentes.....	64
Tabla 3.3. Recubrimiento mínimo del acero de refuerzo en elementos de concreto a la intemperie.....	66
Tabla 3.4. Requisitos para concreto expuesto a soluciones con sulfatos .....	67
Tabla 3.5. Ancho tolerable de grietas en superficies de concreto.....	68
Tabla 3.6. Contenido de cemento mínimo para pisos con desgaste .....	69
Tabla 3.7. Relación A/C y $f'c$ para concretos expuestos a cambios de humedad .....	69
Tabla 3.8. Contenido de aire para concreto resistente a hielo y deshielo .....	70
Tabla 3.9. Porcentaje máximo de minerales reactivos .....	71
Tabla 3.10. Propiedades de algunos materiales básicos para reparación de estructuras de concreto.....	77
Tabla 3.11. Propiedades de selladores de grietas.....	78
Tabla 3.12. Características de sistemas de protección superficial .....	79
Tabla 3.13. Aplicaciones de los sistemas de protección .....	79
Tabla 3.14. Características de sistemas de protección superficial contra los ácidos.....	89
Tabla 4.1. Algunos ejemplos de modelos de diseño por durabilidad especializados en el estudio de estructuras nuevas .....	94
Tabla 5.1. Resultados de falla a la compresión simple de los núcleos de concreto (ASTM C42) .....	111

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1. Zona de ingreso de montacargas (04/07/05) .....	104
Fotografía 5.2. Concreto de la losa se destruye manualmente (04/07/05) .....	104
Fotografía 5.3. Pérdida de pasta de cemento en zona de ingreso de montacargas (04/07/05) .....	105
Fotografía 5.4. Área alrededor de paredes delaminada (04/07/05).....	105
Fotografía 5.5. Curva sanitaria completamente destruida (04/07/05) .....	106
Fotografía 5.6. Delaminación dificulta la limpieza del piso (04/07/05).....	106
Fotografía 5.7. Losa congelada que dificulta la inspección (04/07/05) .....	107
Fotografía 5.8. Paso 1. Delimitación de áreas críticas (26/08/05) .....	118
Fotografía 5.9. Paso 2. Remoción del concreto deteriorado (26/08/05) .....	118
Fotografía 5.10. Paso 3. Superficie recién cortada (29/08/05).....	119
Fotografía 5.11. Paso 3. Limpieza de superficie (29/08/05) .....	120
Fotografía 5.12. Paso 4. Colocación del refuerzo de reparación (30/08/05).....	120
Fotografía 5.13. Paso 4. Refuerzo de reparación a 6 cm de la base (30/08/05).....	121
Fotografía 5.14. Paso 5. Colocación del concreto de reparación (31/08/05) .....	121
Fotografía 5.15. Medición de revenimiento sin aditivos (31/08/05) .....	122
Fotografía 5.16. Medición de la temperatura (31/08/05).....	123
Fotografía 5.17. Inspección visual de agregados (31/08/05) .....	123
Fotografía 5.18. Revenimiento con aditivos (31/08/05) .....	124
Fotografía 5.19. Medición del contenido de aire (31/08/05) .....	124
Fotografía 5.20. Cinco por ciento de contenido de aire (31/08/05).....	125
Fotografía 5.21. Fabricación de las vigas y cilindros de prueba (31/08/05) .....	125

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En este informe del proyecto de graduación se propone un procedimiento para la detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial. La base del procedimiento es un marco teórico en donde se desarrollan los conceptos generales. El procedimiento se desarrolla en dos etapas: la primera se refiere a la detección y tratamiento de patologías en estructuras en servicio que se encuentran en operación o servicio, la segunda trata la prevención de patologías en estructuras nuevas en etapa de diseño. Seguidamente, se valida el procedimiento mediante la aplicación del mismo al estudio de un caso particular de un sistema de concreto que forma parte de una industria. Finalmente, se presenta el capítulo de conclusiones y recomendaciones con respecto a la aplicación del procedimiento propuesto.

El marco teórico explica los conceptos de Durabilidad, Patología Estructural como rama de la Ingeniería Forense y realiza una descripción y clasificación de las diversas patologías en sistemas de concreto estructural.

El capítulo de detección y tratamiento de patologías en estructuras en servicio incluye una metodología de diagnóstico denominada el Método de Tres Niveles, los conceptos de diseño correctivo por durabilidad basado en los principales códigos de diseño, un procedimiento para diseñar y ejecutar la reparación tomando en cuenta el diagnóstico y las especificaciones de diseño, los aspectos que se deben controlar para asegurar la calidad durante el proceso de reparación, y por último las medidas de protección y mantenimiento para el elemento reparado.

En el capítulo de prevención de patologías en estructuras nuevas se exponen las especificaciones de diseño preventivo por durabilidad, los aspectos de control de calidad del proceso constructivo y el mantenimiento y protección de los elementos una vez construidos dependiendo de las condiciones de servicio a las que estarán expuestas.

El caso de estudio trata de una losa de piso de concreto reforzado que forma parte de las cámaras de congelación perteneciente a una industria alimenticia. Según una

investigación previa realizada en industria láctea, de fertilizantes y procesadoras de alimentos, se considera necesario aplicar la metodología de detección, tratamiento y prevención de patologías en infraestructura industrial, ya que se en estos casos se observó que la estructura sufre los efectos de las patologías provocadas por agentes externos que forman parte del microclima; las condiciones de los microclimas las definen las sustancias que se encuentran en contacto con los elementos de concreto y los sistemas operativos o de producción.

Las conclusiones y recomendaciones se elaboran conforme al alcance y limitaciones de la aplicación del procedimiento de detección, tratamiento y prevención de patologías propuesto. Como conclusión general de la investigación, se considera que los profesionales en ingeniería civil de nuestro país aún no han desarrollado la conciencia necesaria para establecer normativa que trate aspectos de durabilidad, reparación y mantenimiento de estructuras de concreto. Por consiguiente no se cuenta con equipo de ensayo y laboratorios especializados que sirvan como instrumento para realizar estudios técnicos en durabilidad y patologías del concreto.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo General***

Desarrollar un procedimiento para la detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural y realizar su aplicación a un caso de estudio en infraestructura industrial.

### ***2.2. Objetivos Específicos***

1. Elaborar un marco teórico que explique aspectos de durabilidad y patologías en las estructuras de concreto.

2. Plantear una metodología para la detección y tratamiento de patologías en estructuras de concreto en servicio, que incluya: procedimiento de diagnóstico, especificaciones de diseño correctivo por durabilidad, sistema de reparación, control de calidad del proceso constructivo y medidas de mantenimiento o protección.

3. Plantear una metodología para la prevención de patologías en estructuras de concreto nuevas, que incluya: especificaciones de diseño por durabilidad, control de calidad del proceso constructivo y medidas de mantenimiento o protección.

4. Aplicar los procedimientos de detección, tratamiento y prevención de patologías al estudio de un caso específico en infraestructura industrial.

5. Obtener conclusiones y recomendaciones con respecto a la aplicación del procedimiento propuesto.

### **3. ALCANCE**

Para cumplir con los objetivos específicos propuestos se desarrollan los siguientes aspectos:

1. El marco teórico constituye la base para el desarrollo del procedimiento de detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural, ya que contiene los conceptos generales de Durabilidad y Patología Estructural; además brinda una clasificación de patologías tanto según la etapa del proyecto en donde se originan (diseño, construcción y operación), como según el tipo de agente causante (interno y externo).

2. El método de detección y tratamiento de patologías para las estructuras de concreto en servicio u operación. Para la detección de patologías se emplea la metodología de diagnóstico de Tres Niveles, la cual es una adaptación de un método de análisis propuesto por el Instituto Nacional de Carreteras de Estados Unidos (National Highway Institute) y toma en cuenta las principales guías para la evaluación de las estructuras de concreto. El tratamiento de patologías contempla las especificaciones de diseño correctivo por durabilidad, el sistema de reparación, el control de calidad durante el proceso de reparación, el mantenimiento y protección de los elementos estructurales.

3. El método para la prevención de patologías para las estructuras de concreto nuevas en etapa de diseño. Este procedimiento incluye un apartado de diseño preventivo por durabilidad, el control de calidad durante el proceso constructivo y el mantenimiento y protección de los elementos estructurales recién construidos.

4. La aplicación del método de detección y tratamiento de patologías en el estudio de un caso de una losa de concreto reforzado que constituye el piso de cuatro cámaras de congelación que pertenece a una industria alimenticia.

5. Las conclusiones y las recomendaciones correspondientes a la aplicación del procedimiento propuesto para la detección y tratamiento de las patologías encontradas en el caso de la losa de piso de las cámaras de congelación.

Se debe tomar en cuenta que las especificaciones de diseño por durabilidad y el control de calidad son producto de investigación en normativa, códigos de diseño, especificaciones, recomendaciones y documentos del Instituto Americano del Concreto (ACI), de la Federación Internacional del Concreto (*fib*), de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto, entre otros.

La reparación, el mantenimiento y protección se basa en los documentos del Instituto Internacional de Reparación del Concreto (ICRI), el documento Reparación y Mantenimiento Ilustrado de Concreto (Concrete Repair and Maintenance Illustrated) de Emmons y Reparación de superficies horizontales de concreto (Spall Repair of Horizontal Concrete Surfaces) del ACI RAP.

#### **4. LIMITACIONES**

Las limitaciones que se encuentran durante la ejecución de este trabajo para realizar la detección, tratamiento y prevención de las patologías en el concreto, son las siguientes:

1. Por el momento en Costa Rica se cuenta solamente con algunos estudios generales de patologías en concreto. La mayoría de estudios y de manuales de reparación son extranjeros y éstos hacen referencia a metodologías y equipo de uso restringido en el país.

2. Los ingenieros civiles costarricenses no cuentan con normativa que traten los temas de durabilidad y reparaciones en sistemas de concreto estructural.

3. Los laboratorios de materiales de construcción de nuestro país no cuentan con acceso a equipo especializado de ingeniería para realizar pruebas o ensayos que brinden información detallada para el diagnóstico de las condiciones de deterioro y problemas de



durabilidad. Según el proyecto de graduación de Chaves (2001), el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMME), cuenta solamente con equipo no destructivo de detector de barras para encontrar el acero de refuerzo, esclerómetros y soluciones como la fenolftaleína para determinar cualitativamente la presencia de carbonatación en un elemento estructural; sin embargo, no cuenta con equipo especializado como el caso de: medidores de resistividad, de potenciales, de velocidad de corrosión, de profundidad de carbonatación, de perfil de cloruros, entre otros. Por esta situación, llevar a cabo pruebas destructivas y no destructivas en el LANAMME o en otros laboratorios de materiales en estas condiciones es difícil, ya que se tiene que iniciar con la compra del equipo, acondicionamiento del espacio físico y disponibilidad de tiempo para realizar las pruebas. Para realizar pruebas especializadas, como el análisis petrográfico y químico de secciones delgadas de concreto, una alternativa es enviar las muestras a un laboratorio en Suramérica o Norteamérica, con los costos que esto implica.

4. Por las razones descritas anteriormente, durante la ejecución de este trabajo de investigación no se cuenta con los recursos mínimos necesarios para aplicar en el caso de estudio específico el tercer nivel de la metodología de diagnóstico propuesta (Nivel 3: Análisis de laboratorio y matemáticos especializados).

5. Las cámaras industriales de congelación en estudio se encuentran en operación, por lo que los recursos de tiempo y espacio para llevar a cabo la inspección, pruebas y mediciones, son limitados. Además, por el mismo motivo la reparación debe realizarse de forma parcial, en las áreas más afectadas de solamente dos de las cuatro cámaras. Este tipo de limitaciones son las que generalmente debe enfrentar un ingeniero en los proyectos de rehabilitación de estructuras existentes y en especial en infraestructura industrial.

# **CAPITULO 2**

## **MARCO TEORICO**

### **1. INTRODUCCIÓN**

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar la importancia del estudio de la durabilidad de las estructuras civiles y los conceptos generales para aplicar el procedimiento de detección, tratamiento y prevención de patologías.

Los conceptos que se incluyen son los de Durabilidad y Patología Estructural. Además, se clasifican las patologías según la etapa del proyecto en que se producen (diseño, construcción y operación) y según el origen del agente causante (externo o interno a la composición del concreto); para cada una de las patologías se describen los aspectos más relevantes de los mecanismos de deterioro.

### **2. CONCEPTOS GENERALES**

#### ***2.1. Durabilidad***

La durabilidad del concreto estructural se define como su capacidad para resistir las diversas acciones producidas por el medio que lo rodea. Estas acciones pueden ser producidas por condiciones climáticas, ataques químicos, biológicos, por abrasión y fatiga, entre otros.

Un concreto resistente a solicitaciones impuestas no necesariamente es un concreto durable. En el proceso de diseño se debe considerar tanto las propiedades de resistencia como las condiciones del medio y de los materiales que son determinantes para la durabilidad.

Toda estructura de concreto debe cumplir con las funciones para la que fue diseñada, manteniendo perfectas características de resistencia, forma y utilidad, tanto para la exposición del ambiente que lo rodea, como para el tiempo de servicio especificado. Esto no quiere decir que el concreto debe conservar sus características indefinidamente, soportando cualquier tipo de acción, sin ningún mantenimiento.

El desempeño y la durabilidad de una estructura, dependen básicamente de los siguientes factores:

- Diseño y cálculo estructural: selección de la geometría o la forma correcta del elemento y de la adecuada cantidad y posición del acero de refuerzo, para cumplir con los requerimientos de resistencia, tanto para las cargas de diseño, como para las condiciones ambientales y de servicio.
- Materiales: escogencia del concreto, del acero de refuerzo, los aditivos, las adiciones del cemento y productos de protección superficial como los poliméricos y epóxicos que deben cumplir con los estándares de calidad y con los requisitos de aplicación.
- Práctica constructiva: uso de mano de obra calificada y adecuados procesos constructivos de curado, de protección del concreto y de control de calidad.
- Operación: cumplimiento de un plan de mantenimiento preventivo dependiendo de las condiciones de servicio a las que se encuentra sometida el sistema estructural.

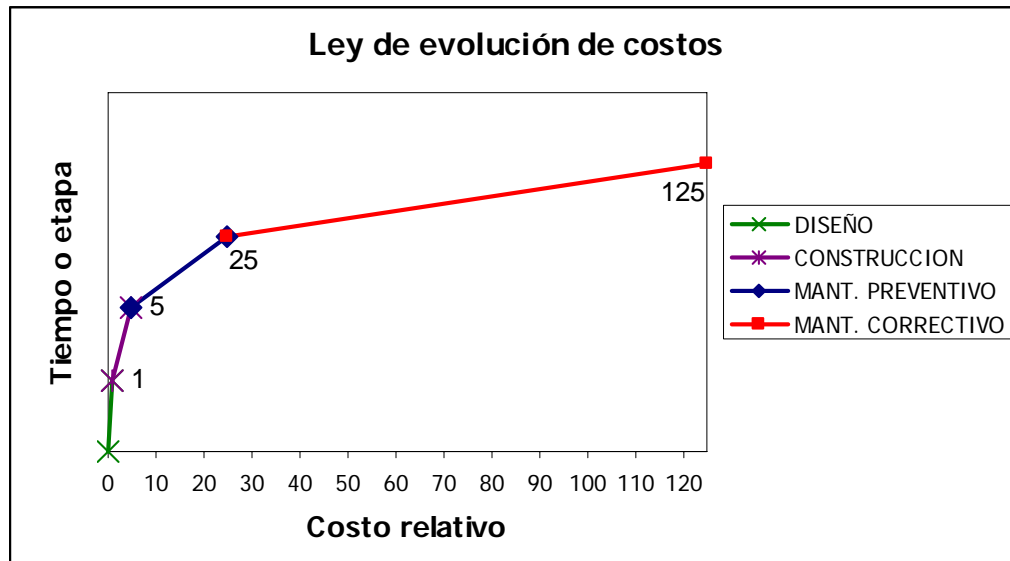
El diseñador debe tomar en cuenta que las condiciones del medio ambiente han experimentado cambios paulatinos, debidos a los efectos del uso generalizado de máquinas de combustión y al empleo de sustancias químicas como materia prima para la elaboración de un sinnúmero de productos. Los sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial sufren deterioros como consecuencia de la acción de las sustancias y los procesos. Algunos ejemplos de sustancias agresivas son: el ácido láctico en las plantas de elaboración de derivados de la leche, los ácidos orgánicos derivados del procesamiento de frutas, la materia prima y productos de las industrias químicas como la farmacéutica, pinturas y fertilizantes. Entre los procesos perjudiciales para los elementos de concreto se encuentran: la abrasión, la vibración, el desgaste, los choques térmicos y de presión.

Por el desconocimiento de los factores que intervienen en la durabilidad del concreto, por la falta de diagnósticos oportunos y un inadecuado mantenimiento, los efectos de las patologías avanzan hasta el punto que las estructuras industriales y civiles se vuelven ineficientes e inseguras. Además, implementar medidas correctivas (plantear y ejecutar procesos de reparación) en obras existentes en operación implica un altísimo costo financiero; mientras que si se ejecutan medidas preventivas desde la concepción del diseño resulta económicamente más aceptable.

Según Mehta y Monteiro (1993), se estima que en países desarrollados más del 40% de los recursos de la industria de la construcción se emplean en la reparación y mantenimiento correctivo de estructuras existentes. Según Castro (1998), en México el 90%

de las industrias presentan algún grado de corrosión en su infraestructura y en ciudades costeras como Yucatán se destina aproximadamente 8% del PIB estatal en reparaciones de edificios afectados por la corrosión.

Para ejemplificar la relevancia de los costos de reparación de la infraestructura civil, en la figura 2.1. se presenta la Ley de Sitter (Ley de evolución de costos), en donde se le asigna un costo relativo de una unidad a las decisiones que se toman durante el proceso de diseño y planificación de un proyecto. Las medidas tomadas en la construcción tienen un impacto en el costo cinco veces mayor, el mantenimiento preventivo tiene un costo relativo 25 veces mayor; mientras que el costo del mantenimiento correctivo tiene un impacto de 125 veces el costo del diseño.



**Figura 2.1. Ley de evolución de costos (Ley de Sitter)**

**Fuente:** Helene (2003)

El estudio de durabilidad y patología del concreto ha tomado importancia en las últimas décadas, especialmente entre los ingenieros diseñadores de la mayoría de países desarrollados, interesados tanto en conservar su patrimonio arquitectónico y su infraestructura de servicios, como en producir obras perdurables en el tiempo que cumplan adecuadamente con la funcionalidad.

En Estados Unidos el Instituto Americano del Concreto (ACI) cuenta con más de 10 comités específicos que se dedican al estudio de temas de durabilidad, entre los principales

se encuentran: 201 Concreto Durable, 364 Evaluación de Estructuras de Concreto, 365 Predicción de la Vida de Servicio y 546 Reparación de Concreto. Además, se tiene el soporte del Instituto Internacional de Reparación de Concreto (ICRI).

En Europa la Comisión 5 de la Federación Internacional del Concreto (fib) se dedica a estudiar los aspectos de la vida de servicio de las estructuras mediante grupos de trabajo (Task Group): TG 5.3 Evaluación, mantenimiento y rehabilitación, TG 5.4 Construcción para vida de servicio incluyendo especificaciones para estructuras de concreto preesforzado, TG 5.6 Código Modelo para la vida de servicio de diseño de estructuras de concreto y TG 5.7 Guía de diseño para la vida de servicio. Además, se cuenta con el apoyo de los comités técnicos de la Unión Internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción (RILEM).

En algunos países de Suramérica, como en Colombia, Brasil y Argentina, los códigos de diseño incluyen un apartado de durabilidad, en donde se citan las condiciones ambientales y las recomendaciones que se deben tomar en cuenta en el diseño y construcción de una estructura.

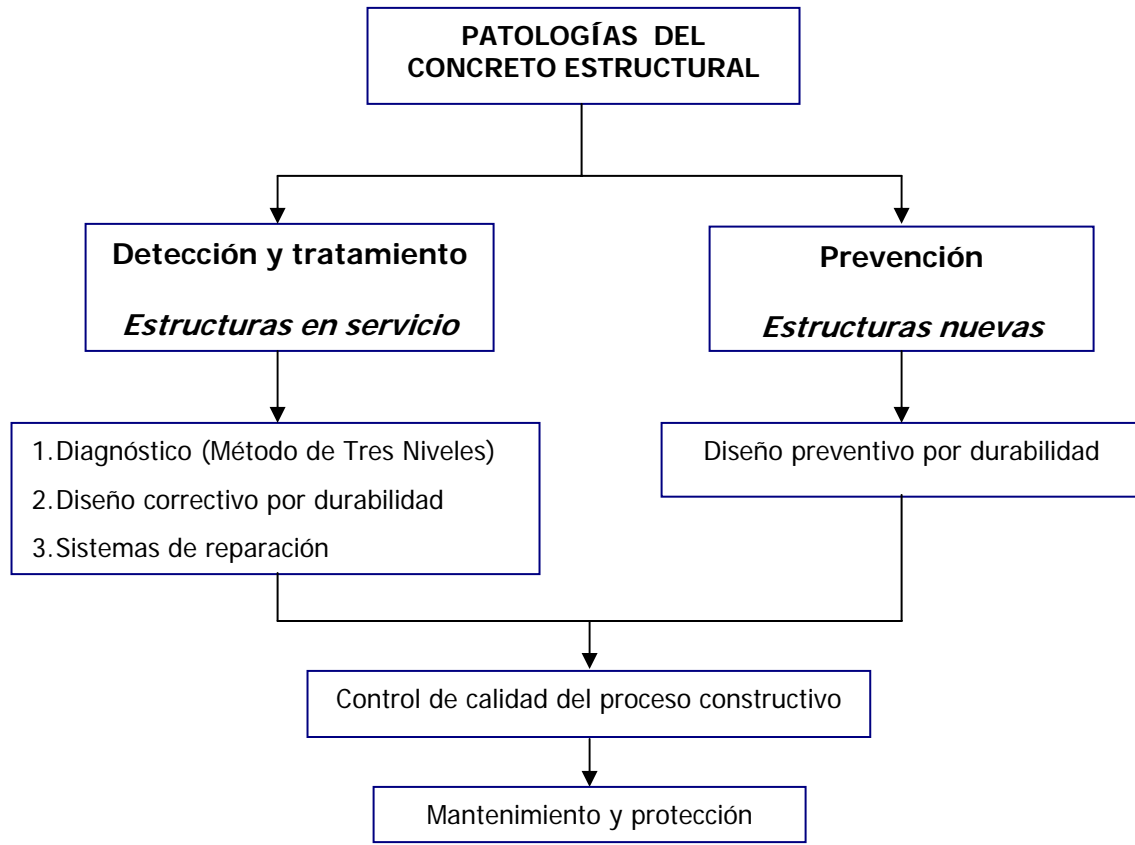
## ***2.2. Patología Estructural***

La Patología Estructural se define como la disciplina de la Ingeniería Forense que detecta, trata y previene las patologías o daños que se presentan o se podrían presentar en los sistemas de concreto.

En las estructuras en servicio, el estudio comienza con la detección de las causas y consecuencias del deterioro (diagnóstico), luego se realiza un diseño correctivo tomando en cuenta los requisitos de durabilidad y por último se establecen los procesos de reparación, control de calidad y mantenimiento de la reparación.

En el caso de estructuras nuevas, la Patología Estructural establece recomendaciones y especificaciones de diseño preventivo por durabilidad, control de calidad durante el proceso constructivo y protección de los elementos después de construidos.

En el esquema de la figura 2.2. se muestra la interacción entre los conceptos de detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural.

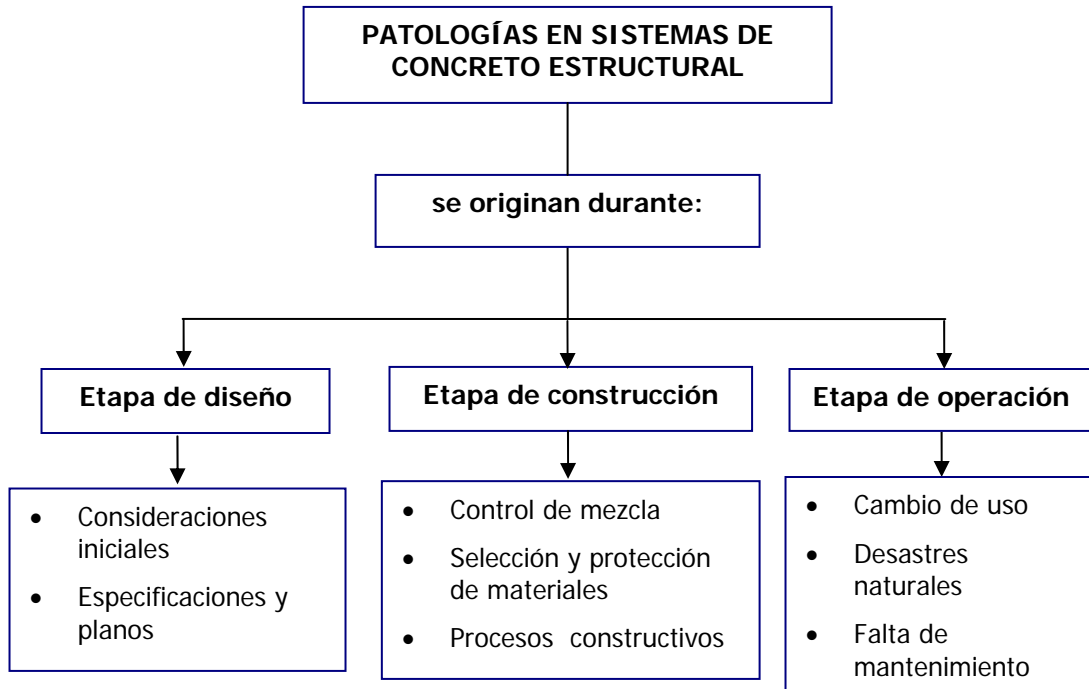


**Figura 2.2. Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural**

### 3. PATOLOGÍAS DEL CONCRETO ESTRUCTURAL

#### 3.1. Clasificación de las patologías según la etapa del proyecto

Las patologías que sufre una estructura de concreto se pueden clasificar según la etapa del proyecto en donde se originan, según se ilustra en la figura 2.3.



**Figura 2.3. Clasificación de patologías según etapa de origen**

#### 3.1.1. Patologías durante la etapa de diseño

El diseño de cualquier estructura, no sólo debe contemplar las consideraciones mecánicas de resistencia, sino también las condiciones ambientales que rodean a la estructura.

En la actualidad, por el avance en los códigos y en los métodos e instrumentos de cálculo estructural, se tiende a optimizar los recursos disponibles para la construcción (materiales), logrando estructuras más eficientes con un adecuado comportamiento estructural, pero en algunos casos más vulnerables a sufrir problemas de durabilidad.

Dentro de las principales razones por las que se originan patologías durante la etapa de diseño se tienen las siguientes:

- Dejar de considerar las condiciones ambientales y de servicio que soportará la estructura.
- Omitir el diseño de juntas de contracción, dilatación o construcción. El concreto es un material que cuenta con muy baja resistencia a la tensión y se fisura o se agrieta fácilmente, por lo que los elementos deben contar con el acero necesario para controlar la retracción por temperatura y con el diseño adecuado de juntas.
- Omitir o diseñar inadecuadamente sistemas de drenaje que disminuyan o eviten el contacto entre el agua u otros fluidos con el concreto. Se deben reducir o evitar los ciclos de humedecimiento y secado.
- Omitir en los planos constructivos o en los documentos de especificaciones técnicas, las indicaciones de resistencia y las características requeridas de los materiales, tales como las características del concreto, del acero, los recubrimientos y sistemas de tratamiento o protección superficial.
- Realizar un diseño de mezcla de concreto sin tomar en cuenta los requerimientos de durabilidad para la exposición y el uso que va a sufrir el elemento estructural.
- Dimensionar inadecuadamente los elementos, con una deficiente distribución del acero de refuerzo, recubrimientos insuficientes y no revisar las deformaciones del modelo estructural.
- Omitir detalles claros y específicos en los planos constructivos sobre aspectos críticos de durabilidad, como los recubrimientos y la distribución del acero de refuerzo.

### **3.1.2. Patologías durante la etapa de construcción**

El proceso constructivo debe generar un producto totalmente apegado a los planos y a las especificaciones de diseño. Las obras tienen un tiempo definido para ejecutarse, por lo que los métodos constructivos han mejorado su eficiencia por medio de la industrialización de la construcción, el uso de tecnología y estrictos controles de calidad.

A pesar de la industrialización y la mejora en procesos, es importante destacar que la mano de obra, sigue siendo el principal recurso de la construcción y como cualquier labor humana, es propensa a incurrir en errores.



Dentro de las principales razones por las que se producen patologías durante la etapa de construcción se encuentran las siguientes:

- Dosificar inadecuadamente la mezcla de concreto en sitio: adicionar agua, cemento y aditivos sin control o utilizar agregados de tamaño equivocado y pureza cuestionable.
- Omitir el control en la calidad de los ingredientes de la mezcla.
- Omitir el control en la calidad del concreto en sitio, al no realizar pruebas de revenimiento, verificación de los agregados y la preparación de cilindros para ensayos de resistencia en laboratorio.
- Emplear malas prácticas de colocación y compactación del concreto.
- Construir inadecuadamente las juntas de contracción.
- Omitir las tareas de protección y aplicar prácticas de curado del concreto inapropiadas.
- Omitir el control de resistencia del acero de refuerzo.
- Cometer errores en la colocación y el retiro prematuro de los encofrados.
- Omitir la colocación en la posición adecuada del acero de refuerzo antes del colado, irrespetando el recubrimiento y separación mínimos.
- Irrespetar las especificaciones y el diseño, por la inadecuada interpretación de los planos, cambiando el comportamiento de la estructura.
- Ejecutar inadecuadamente los procedimientos de montaje de elementos prefabricados, que induzcan deformaciones, impactos y vibraciones no previstas.
- Cargar la estructura prematuramente, cuando los elementos aún no han desarrollado la resistencia para soportar las cargas impuestas.
- Picar elementos para introducir tuberías de instalaciones electromecánicas.

### **3.1.3. Patologías durante el período de operación**

El comportamiento y desempeño de una estructura durante su vida útil, depende de los procesos de diseño, elección de materiales y de la construcción. Este período de vida útil puede verse disminuido significativamente por las condiciones en las que opere la infraestructura.

Las patologías producidas durante la etapa de operación generalmente se presentan por las siguientes circunstancias:

- Cambio de uso o abuso de la estructura: se incrementan los requerimientos de resistencia por el aumento en las cargas de servicio, las vibraciones, los impactos y los cambios de configuración estructural por remodelaciones sin control; además por otro lado se producen cambios en las condiciones ambientales o de exposición de los elementos. Los cambios que son provocados por la acción del usuario y administrador del inmueble, traen consigo deterioros irreversibles en la estructura, ya que imponen condiciones que no fueron tomadas en cuenta en el diseño.
- Desastres naturales o accidentes: entre los desastres que provocan más daño a una obra civil se encuentran incendios, explosiones, choques o impactos, inundaciones, terremotos y huracanes.
- Falta de mantenimiento: no se establece un manual con procedimientos de mantenimiento y protección, con base en las condiciones de operación de la estructura. El mantenimiento es necesario para impedir el deterioro y conservar las condiciones originales de desempeño por resistencia y durabilidad.

### ***3.2. Clasificación de las patologías según el origen del agente causante***

El concreto es un material que interactúa con el medio ambiente. Dependiendo de sus características de permeabilidad y porosidad, y de la agresividad del medio que rodea a la estructura, pueden ocurrir procesos de deterioro de carácter químico, mecánico, físico y biológico.

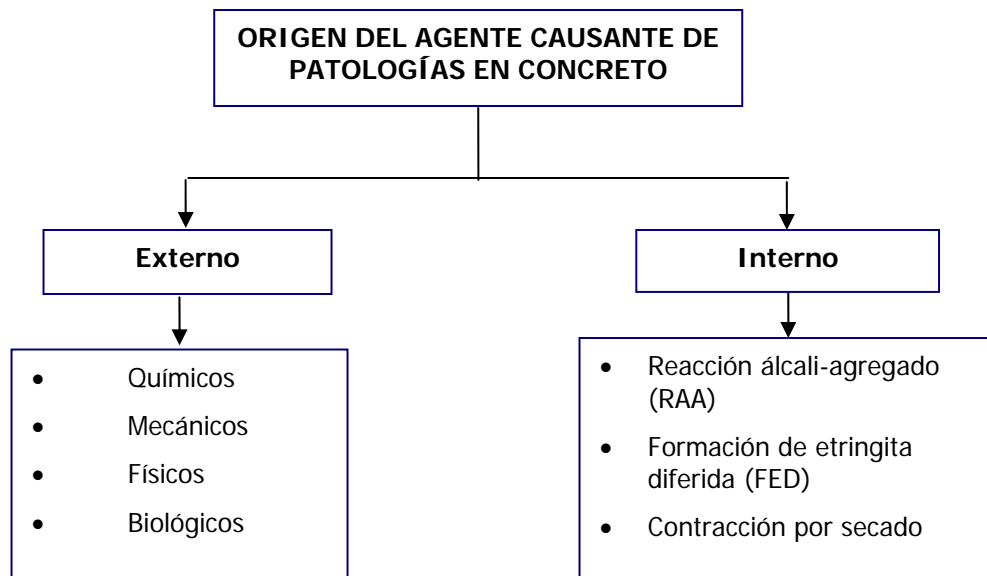
El microclima o medio ambiente inmediato que rodea a la estructura se caracteriza por las condiciones de humedad, de temperatura, de presión y la presencia de agentes agresivos.

Los agentes agresivos en los casos de los ataques químicos y biológicos están constituidos por sustancias, generalmente en estado líquido o gaseoso. En los casos de deterioros del tipo mecánico y físico, las causas pueden ser debidas a sobrecargas, impactos y cambios de temperatura y de humedad.

La penetración, la velocidad del deterioro o los efectos de un agente agresivo, depende tanto del concreto y microclima, como de los mecanismos de transporte e

interacción que se dan en el sitio. Entre los mecanismos de transporte de sustancias agresivas, se tiene: el transporte por aire cargado de humedad, por agua de lluvia, salpicaduras y por inmersión.

Los deterioros del concreto, pueden ser causados por agentes externos al material y por agentes internos. En la figura 2.4. se observa la clasificación de las patologías según el origen del agente causante.



**Figura 2.4. Clasificación de patologías según el origen del agente causante**

### **3.2.1. Agentes Externos**

#### 1. Químicos

El principal efecto provocado por los agentes químicos en contacto con el concreto endurecido, es la desintegración de la pasta del cemento. La reacción entre la solución agresiva y la pasta puede generar productos solubles o insolubles expansivos.

Las reacciones por agentes químicos traen consigo el descenso del pH, o sea la pérdida de alcalinidad de la pasta del cemento, lo que reduce la capacidad del concreto para proteger el acero de refuerzo de la corrosión. El fenómeno de corrosión de los metales se genera a partir de una reacción química interna favorecida por la presencia de alguna sustancia del entorno.

Las sustancias agresivas, se trasladan desde la fuente contaminante (medio ambiente o microclima), hasta la superficie y penetran en el interior de la masa de concreto. Los daños provocados por las reacciones químicas, pueden presentarse tanto

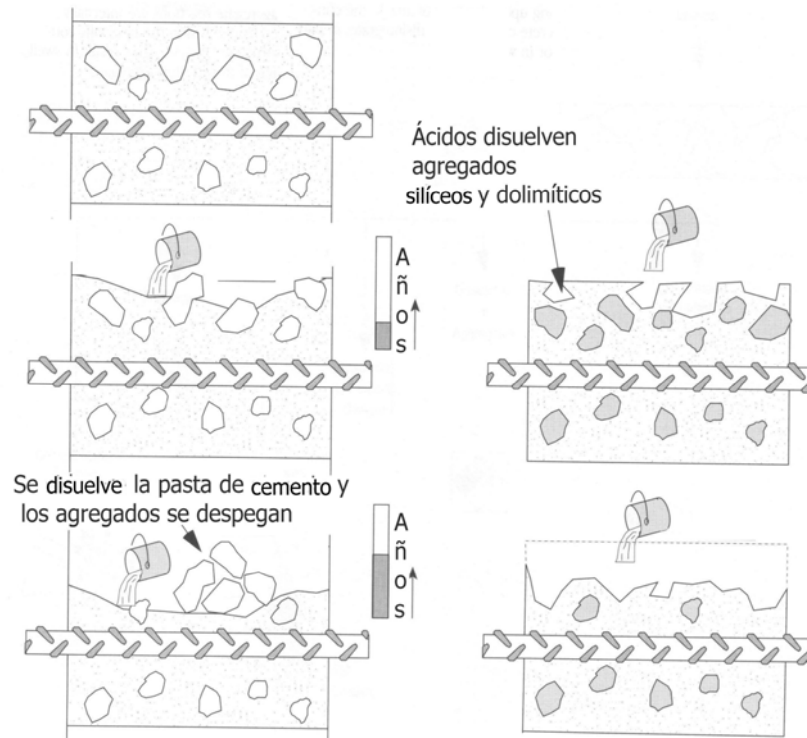
inmediatamente después del contacto, como a largo plazo, esto depende de la concentración de la solución, la velocidad de transporte, el tiempo de exposición y las condiciones de temperatura y presión del medio.

Entre los agentes químicos que deterioran el concreto se encuentran: el ataque de ácidos, la corrosión, el ataque de sulfatos y la carbonatación.

a) Ataque de ácidos

El concreto es un material silicio-calcáreo, con un fuerte carácter básico, cuyo pH alcanza fácilmente valores de 13, por consiguiente es un material susceptible al contacto con cualquier fluido ácido.

El deterioro que sufren los elementos de concreto en contacto con ácidos, es la disolución o pérdida de la pasta del cemento por las reacciones que se producen entre los ácidos y los compuestos cálcicos del cemento hidratado (hidróxido, silicato y aluminato de calcio). En la figura 2.5. se presenta un esquema del deterioro causado por la acción de los ácidos.



**Figura 2.5. Esquema de deterioro del concreto causado por los ácidos**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En la tabla 2.1. se muestran los ácidos comunes más perjudiciales para el concreto.

**Tabla 2.1. Ácidos y sustancias comunes perjudiciales para el concreto**

ÁCIDOS	
INORGÁNICOS	ORGÁNICOS
Clorhídrico	Acético
Brómico	Fórmico
Carbónico	Láctico
Ácido de cromo	Cítrico
Fluorhídrico	Tánico
Fosfórico	Butílico
Nítrico	Úrico
Sulfúrico	Húmico
Sulfuroso	Fenol
OTRAS SUSTANCIAS	
Hidrógeno sulfurado	Grasas animales y vegetales
Sales de amonio	Aceites vegetales
Cloruro de aluminio	Microorganismos

**Fuentes:** Sánchez De Guzmán (2002) y Neville (1999)

El ácido clorhídrico genera cloruro cálcico y el ácido nítrico da como resultado nitrato de calcio, ambos compuesto solubles en agua; mientras que el ácido sulfúrico produce sulfato cálcico que precipita como yeso, también soluble.

La velocidad de degradación del concreto, depende de la concentración del ácido y de la solubilidad del producto de la reacción. Los ácidos inorgánicos más agresivos a temperatura ambiente son: clorhídrico, fluorhídrico, nítrico y sulfúrico; mientras que los orgánicos son: acético, fólico y láctico.

Algunas de las sustancias del medio ambiente que se encuentran en contacto con las estructuras y que se convierten en ácidos, son las siguientes:

- Los gases producto de la combustión que se combinan con la humedad y forman ácido sulfúrico (lluvia ácida).
- El agua de minas, aguas industriales y residuales. Estas forman ácido sulfúrico y sulfuroso; al igual que los vapores volcánicos con alto contenido de azufre.
- Los suelos tipo turbas pueden tener sulfuro de hierro que generan ácido sulfúrico.
- Las aguas montañosas de carácter ácido poseen ácidos orgánicos y bióxido de carbono libre.
- Las industrias agrícolas y agro alimenticias producen grandes cantidades de ácidos orgánicos, tales como: fermentadoras, lecherías, destiladoras, productoras de jugos cítricos y de pulpa de frutas, carnicerías, procesadoras de caña de azúcar y de algunos productos de madera.

#### b) Corrosión del acero de refuerzo

El concreto le ofrece protección contra la corrosión al acero de refuerzo, ya que el oxígeno presente dentro del concreto forma una película de óxido en las barras, que constituye una capa pasiva que impide una corrosión profunda. Además, el carácter básico y la resistencia eléctrica del concreto que recubre el acero evitan la penetración de agentes agresivos.

La principal causa de la corrosión del acero de refuerzo es la disminución de la alcalinidad del concreto que se encuentra expuesto a sustancias agresivas del medio ambiente como los cloruros y los ácidos.

La corrosión en estructuras de concreto estructural depende de los siguientes factores:

- La permeabilidad del recubrimiento: los procesos de corrosión se dan por el fenómeno de difusión en los poros del concreto, de sustancias como el oxígeno, dióxido de carbono o los iones cloruro, que combinados con la humedad ambiental aceleran el deterioro del acero. Un concreto fabricado con una alta relación A/C, una mala compactación, segregación de la mezcla, un deficiente curado y un secado prematuro por efectos del viento o la radiación solar; se convierte en un concreto con alta porosidad y

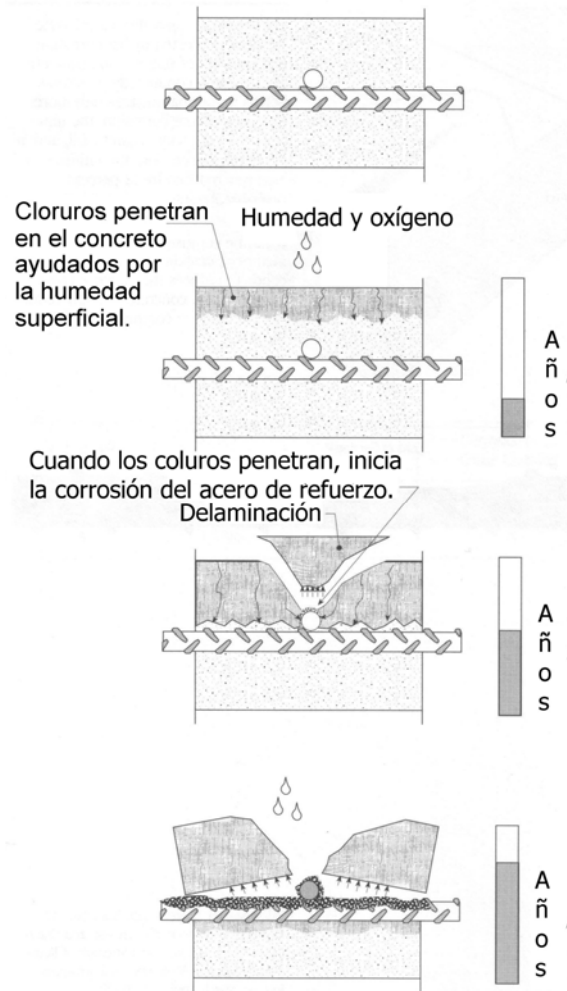
permeabilidad en la zona del recubrimiento, que facilita el ingreso de sustancias agresivas que corroen las armaduras y deterioran el elemento estructural.

- El espesor del recubrimiento: según la Segunda Ley de Fick, la velocidad de penetración del carbonato es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición (Sánchez de Guzmán, 2002); por lo que se estima que si el recubrimiento de un elemento es la mitad que el de otro elemento, el primero sufre oxidación de su refuerzo en una cuarta parte del tiempo que el segundo, estando ambos expuestos a las mismas condiciones ambientales y contruidos con el mismo concreto. (Ver ecuación 2).

- Penetración de cloruros: los cloruros provienen del agua de mar, sales de deshielo y otros iones con un pH cercano a 9; estos producen picaduras locales que disminuyen la sección de las barras de acero. La penetración de cloruros se favorece en los ciclos de humedecimiento y secado.

La corrosión electroquímica es la que se da dentro del concreto, ya que se trata de una reacción química en donde se produce transferencia de iones y electrones en un medio acuoso. La corrosión ocurre dentro de una celda electroquímica, que está formada por: un ánodo donde ocurre la oxidación, un cátodo donde ocurre la reducción, un conductor que ponga en contacto al cátodo con el ánodo y el electrolito para cerrar el circuito.

Los iones  $Fe^{2+}$  y  $OH^-$  se combinan para formar hidróxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ) que combinado con el agua de la atmósfera forman óxido o herrumbre. El óxido de hierro es expansivo, llega a aumentar desde 2 a 7 veces su volumen, dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible para la reacción. Dicho aumento de volumen provoca esfuerzos radiales de tensión que producen fisuras y delaminaciones en el concreto, trayendo como consecuencia la disminución de la adherencia entre el concreto y el refuerzo, generando finalmente una pérdida considerable en la capacidad mecánica del elemento estructural. En la figura 2.6 se muestra un esquema del deterioro provocado por la corrosión.



**Figura 2.6. Esquema de deterioro provocado por la corrosión**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

Existen varios tipos de corrosión electroquímica que tienen lugar dentro del concreto:

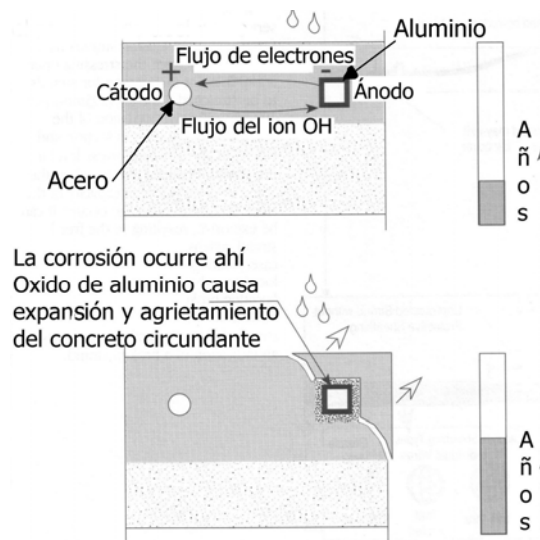
- Uniforme: es la corrosión generalizada por la pérdida de la capa pasivadora, causada por la carbonatación, por la acción intensa de iones cloruro o la lixiviación de líquidos ácidos.
- Localizada: es la corrosión que se concentra en ciertas zonas, en donde penetran directamente el oxígeno, la humedad y sustancias agresivas.
- Picaduras: se manifiesta por picaduras profundas de las zonas anódicas, que se corroen por acción de iones cloruro o como efecto de diferencias entre aleaciones en el acero.



- Biológica: es la corrosión provocada por el contacto del acero con microorganismos biológicos que generan sustancias ácidas y agresivas.

- Bajo esfuerzo: se presenta con mayor frecuencia en elementos de concreto preesforzado como consecuencia de la despasivación local. Se da en las zonas donde el elemento se encuentra sometido a cargas de tensión; en este punto el concreto se fisura, dando paso a agentes agresivos que penetran y corroen la barra de acero.

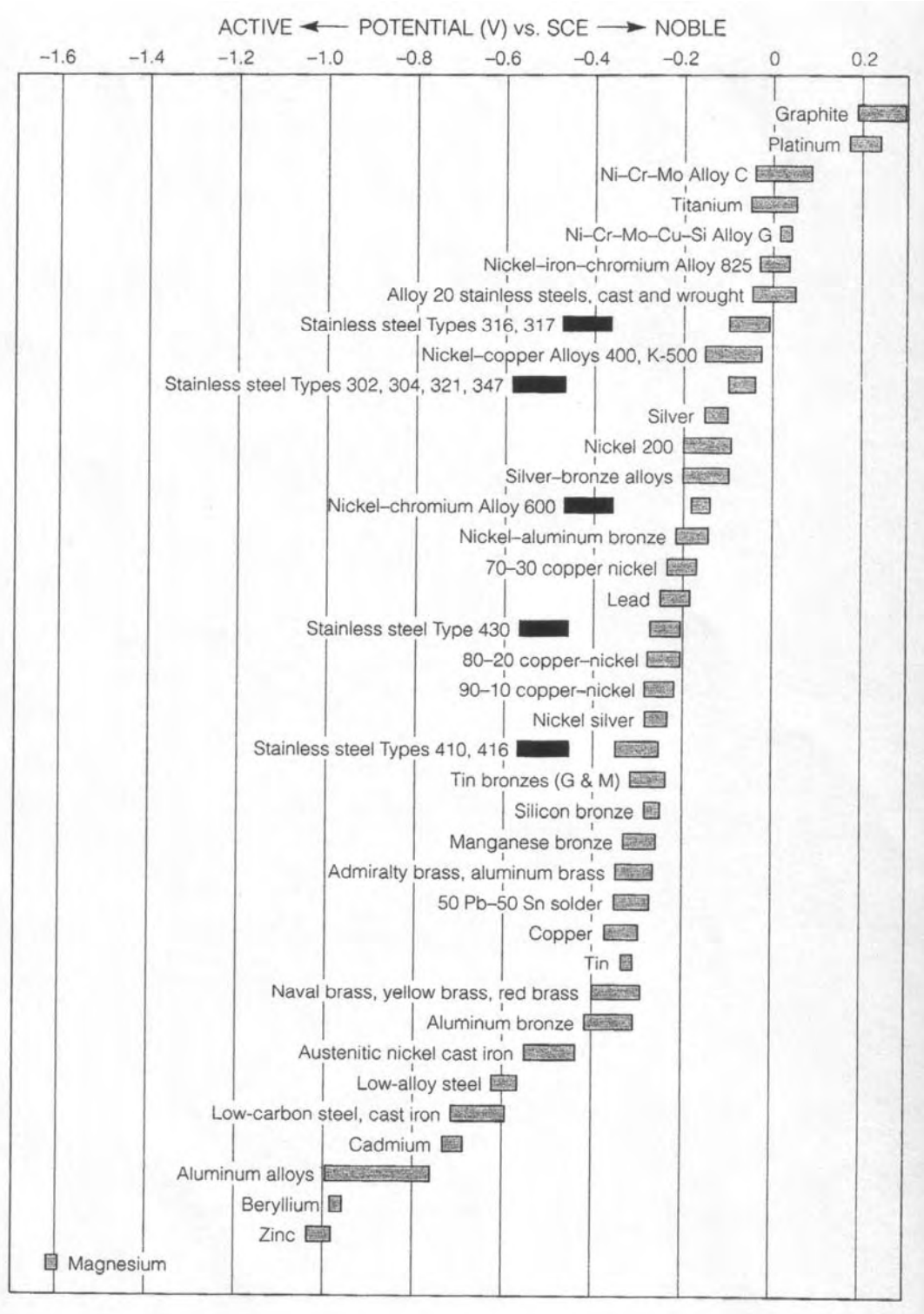
- Galvánica: se presenta cuando dos metales de diferente potencial, están en contacto con el mismo electrolito. En el concreto se da cuando el acero exterior se encuentra más corroído que el interior y cuando el acero se encuentra en contacto con otros metales, como es el caso de tuberías de sistemas eléctricos. En la figura 2.7. se presenta un ejemplo de corrosión galvánica.



**Figura 2.7. Ejemplo de corrosión galvánica en el concreto**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En la figura 2.8. se presenta la tabla de actividad de los metales. Un metal activo se encuentra hacia el extremo izquierdo de la serie de actividad, o sea tiene un potencial medido en Voltios más negativo; este tipo de metal es poco resistente a la corrosión, entre los metales activos se encuentran el magnesio, zinc, aluminio y el hierro. Un metal noble es poco reactivo, o sea el proceso de corrosión en este tipo de metal es más lento, les corresponde potenciales próximos al extremo positivo de la serie de actividad, entre los metales más nobles se encuentran el níquel, cromo, plata, oro y cobre.



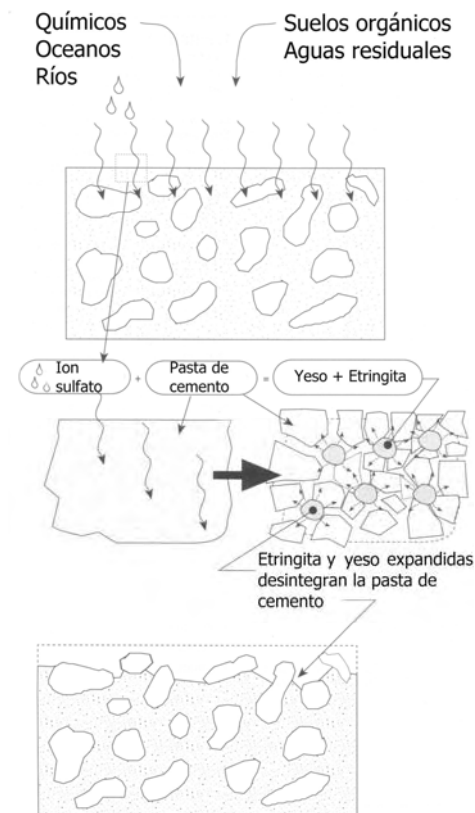
**Figura 2.8. Tabla de actividad de los metales**  
**Fuente: Jones (1996)**

c) Ataque de sulfatos

El ataque que genera el ión sulfato en el concreto, se origina por dos reacciones químicas:

- La combinación de los sulfatos con el hidróxido de calcio de la pasta (cal libre), produce sulfato de calcio soluble (yeso).
- El yeso se combina con el aluminato tricálcico hidratado del cemento ( $C_3A$ ), para formar sulfoaluminato de calcio (etringita).

Estas reacciones dentro de la pasta del cemento, tienen como resultado un aumento en el volumen del sólido, por lo que el concreto se expande, se fractura y se ablanda; produciéndose una pérdida de adherencia entre la pasta, los agregados y el acero de refuerzo, lo cual conlleva a una disminución en la capacidad estructural del elemento. Además, la porosidad de un concreto agrietado, propicia la entrada de diversas sustancias agresivas que se encuentran en el entorno. En la figura 2.9. se muestra el deterioro causado por el ataque de sulfatos en elementos de concreto.



**Figura 2.9. Esquema de deterioro en concreto causado por el ataque de sulfatos**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

El ión sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) puede ser de origen natural, biológico o industrial.

Entre los sulfatos de origen natural, se encuentran los provenientes de suelos orgánicos (turbas y arcillas) y de sus respectivas aguas freáticas, tales como: los sulfatos de amonio, calcio, magnesio, sodio, cobre, aluminio y bario. Otra fuente natural de sulfatos y sales, es el agua de mar. Los cloruros de sodio, magnesio y potasio, junto con los sulfatos anteriormente mencionados, generan acciones altamente agresivas en ambiente marino, por su concentración, temperatura y tiempo de exposición.

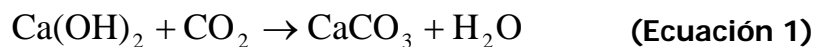
Los sulfatos de origen biológico, provienen de aguas residuales que experimentan descomposición de carácter aeróbico y se transforman en sustancias orgánicas y microorganismos que contienen azufre y proteínas.

Los sulfatos industriales son originados por la combustión de carbón o gasolina; el dióxido de azufre liberado por dicha combustión, forma ácido sulfúrico al combinarse con la humedad atmosférica.

#### d) Carbonatación

La carbonatación, se debe a la penetración del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera o del suelo, dentro de los poros del concreto endurecido.

El  $\text{CO}_2$  se disuelve en los poros, reaccionando con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y produciendo ácido carbónico. Dicho ácido convierte el hidróxido de calcio (cal libre del cemento) en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y agua.

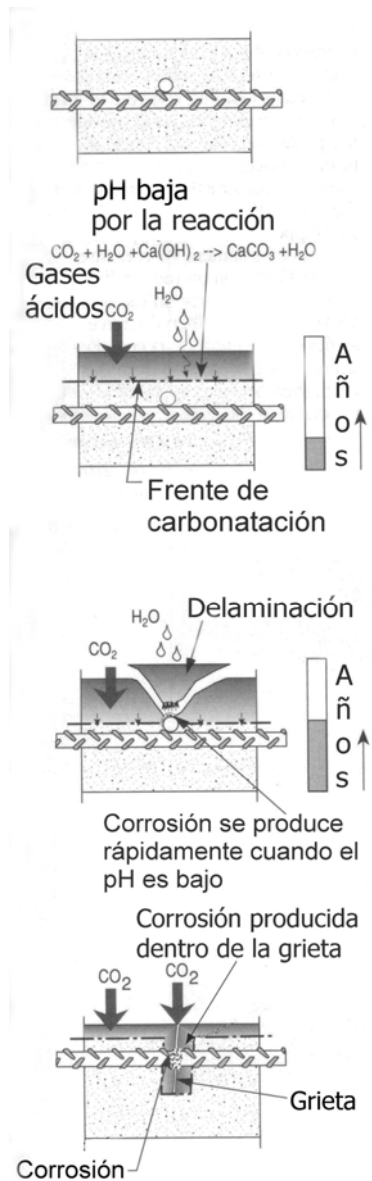


Esta reacción trae consigo dos efectos negativos en el concreto:

- Desciende el pH superficial del concreto de 13, hasta valores iguales o inferiores a 9. El concreto al perder su basicidad, disminuye su capacidad protectora de la corrosión del acero de refuerzo; o sea al aumentar la penetración de la carbonatación (frente de carbonatación), se pierde el efecto de la capa pasivadora del recubrimiento del concreto.

- Se da una contracción adicional en la superficie del concreto, por la disminución del volumen de la pasta de cemento, induciendo el agrietamiento y facilitando el ingreso de sustancias agresivas.

La reacción es más intensa, si los cambios de humedad, presión y temperatura ambiental son más significativos y si la permeabilidad y porosidad del concreto es considerable. El fenómeno es más común en lugares con humedades relativas entre un 65% y 98%. En estructuras que se encuentran permanentemente saturadas no existe la posibilidad de carbonatación, ya que la difusión del dióxido de carbono es posible solamente en poros llenos de aire. En la figura 2.10. se presenta un esquema del deterioro provocado por la carbonatación del concreto.



**Figura 2.10. Esquema de deterioro causado por la carbonatación**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

La profundidad del frente de carbonatación, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición, esto según la Segunda Ley de difusión de Fick:

$$x = k\sqrt{t} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

**x** = profundidad del frente de carbonatación (mm)

**k** = coeficiente de carbonatación

**t** = tiempo transcurrido (años)

El coeficiente de carbonatación **k**, depende de las condiciones ambientales y de las características del concreto. Entre las características ambientales, se encuentran: cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, humedad relativa, temperatura y la presión del medio ambiente. Las características del concreto que toma en cuenta **k** son las relacionadas con la permeabilidad del recubrimiento, tales como: porosidad, difusión y absorción. Generalmente, el coeficiente de carbonatación se determina experimentalmente para determinadas condiciones ambientales, expresándolo en función de alguna característica del concreto como la absorción capilar. Según el documento de la AATH (2001), para muestras de estructuras con 15 a 60 años de exposición en la pampa húmeda Argentina, se ha determinado que el coeficiente de carbonatación es **k = 0.45 S<sup>0.86</sup>**, siendo S la absorción capilar.

## 2. Mecánicas

Las acciones mecánicas se deben principalmente a sobrecargas, deformaciones, impactos o vibraciones, que no fueron contempladas en su diseño. Algunas de estas solicitaciones imprevistas, tienen su origen en un cambio de uso en la obra, un accidente o desastre natural.

Se debe tener en cuenta, que el concreto ofrece una alta resistencia a la compresión, pero una pobre resistencia a la tensión, por lo que los elementos estructurales se refuerzan con barras de acero, que toman los esfuerzos de tensión provocados por el cortante, la flexión y la torsión. En los últimos años, se han fabricado concretos micro reforzados con fibras de polipropileno o metálicas, para evitar las grietas en las zonas de esfuerzos de tensión en concreto plástico y endurecido.

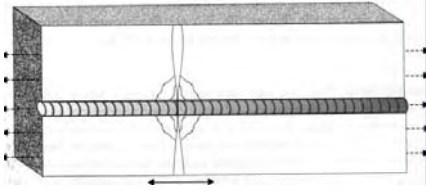
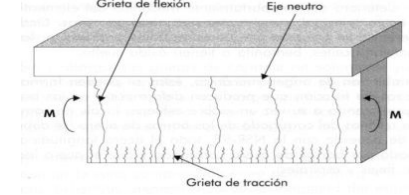
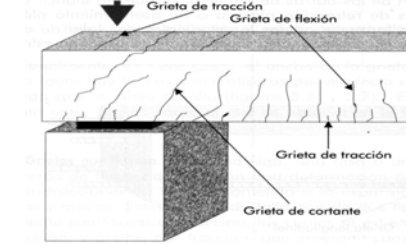
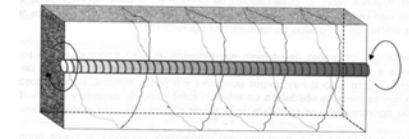
a) Sobrecargas

Al superarse la capacidad resistente del material que constituye el elemento estructural, por la acción de sobrecargas provocadas por eventos imprevistos en el diseño (cambios en las solicitaciones, sismos, vientos, inundaciones, deslizamientos y explosiones); se produce deficiencia estructural que se manifiesta por grietas y deflexiones excesivas.

- Grietas estructurales:

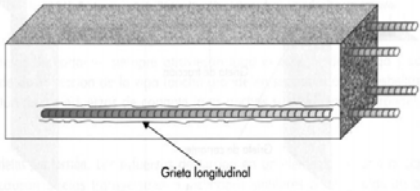
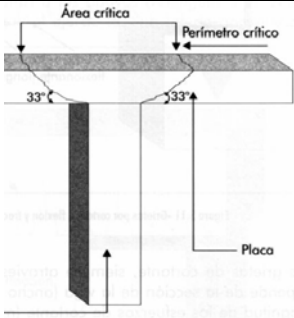
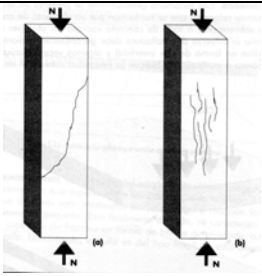
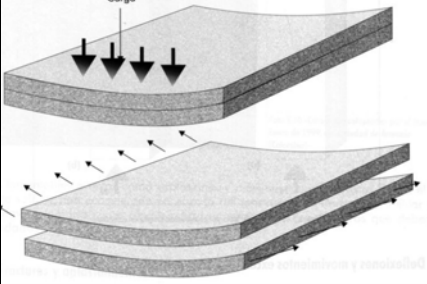
Las grietas estructurales pueden presentar anchos superiores a los 0,5 mm y se originan por errores de cálculo, el desprecio de hipótesis de carga, por la inadecuada especificación de resistencia de materiales y por la construcción de secciones sin respetar los planos. En la tabla 2.2., se observa el tipo de grieta estructural, con sus respectivas características y un esquema para identificarlas.

**Tabla 2.2. Esquema de grietas estructurales y características**

TIPO DE GRIETA ESTRUCTURAL	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
TRACCIÓN PURA	El concreto resiste tracción por medio del acero de refuerzo, cuando las cargas sobrepasan la capacidad estructural de la sección disminuye la adherencia entre el acero y el concreto en una zona produciéndose grietas transversales.	
FLEXIÓN	Las grietas por flexión, son transversales y se extienden a partir de la cara en tensión hasta el eje neutro de la sección. Su causa principal son las precargas, sobrecargas y el insuficiente refuerzo de acero.	
CORTANTE	Aparecen inclinadas cerca de los apoyos o en los puntos de aplicación de cargas concentradas, el ángulo de las grietas es aproximadamente 45°, ya que son lugares de máximo cortante y mínimo momento. Son grietas que atraviesan toda la sección.	
TORSIÓN	Son grietas inclinadas que traspasan toda la sección en forma de espiral.	

Fuente: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

**Tabla 2.2. Esquema de grietas estructurales y características (Continuación)**

TIPO DE GRIETA ESTRUCTURAL	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
LONGITUDINALES	Se forman alrededor del acero de refuerzo y se asocian a fenómenos de retracción plástica que producen una deficiente adherencia entre el acero y el concreto. Las grietas se producen cuando se dan esfuerzos de tensión en el acero principal.	 <p>Grieta longitudinal</p>
PUNZONAMIENTO	Son provocadas por esfuerzos altos originados por cargas soportadas en áreas pequeñas. La superficie de fractura es de forma de tronco de pirámide y es una falla frágil.	 <p>Área crítica</p> <p>Perímetro crítico</p> <p>33°</p> <p>33°</p> <p>Placa</p>
COMPRESIÓN	Si se supera la capacidad de carga axial de un elemento columna se producen grietas paralelas a la dirección de la carga.	 <p>N</p> <p>T<sub>N</sub></p> <p>(a)</p> <p>(b)</p>
CIZALLADURA	Se produce un deslizamiento por falta de adherencia o anclaje entre las diferentes capas de un elemento.	 <p>Carga</p>

**Fuente:** Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

- Deflexiones excesivas:

Entre las deformaciones excesivas provocadas por movimientos imprevistos, se tiene las que son producto de asentamientos del terreno y las impuestas por eventos fortuitos como los desastres (sismo, viento, inundaciones, deslizamientos y explosiones).



Si se presentan movimientos diferenciales en la estructura y ésta no es capaz de redistribuir las cargas rápidamente, sufre fallas y fracturas en los elementos más esbeltos y rígidos, tales como las paredes, muros y en los acabados (cielos, ventanas y pisos). Durante eventos intensos como los desastres naturales mencionados, las deformaciones de la estructura la pueden llevar fácilmente al colapso.

#### b) Impactos y vibración

Los impactos y vibraciones pueden propagar grietas, que se desarrollan conforme pasa el tiempo.

El diseño estructural toma en cuenta el impacto, empleando parámetros conservadores, por ejemplo el diseño de una estructura que soporta maquinaria pesada, puede considerar factores de amplificación de la carga temporal entre un 25% y 33%.

El diseño por vibración debe considerar el efecto de las cargas dinámicas, evitando la resonancia, que se produce cuando la frecuencia natural de la estructura de apoyo es similar a la frecuencia de la fuente vibrante. La relación entre frecuencia de la estructura y la frecuencia perturbadora, debe estar fuera de los valores comprendidos entre 0,5 y 1,5.

#### c) Abrasión

La resistencia del concreto a resistir la abrasión, se define como la capacidad para que la superficie pueda soportar el desgaste producido por fricción, erosión y cavitación provocada por un agente externo.

La fricción es el desgaste de la superficie de pisos y pavimentos de concreto, por la acción del tránsito de camiones, vehículos y montacargas, que generan raspaduras y patinazos.

La erosión es propia de obras hidráulicas (presas, túneles, conducciones, pilas de puentes y canales), en donde el flujo de agua transporta partículas sólidas que desgastan la superficie. La magnitud de la erosión, depende de las características tanto mecánicas del flujo (velocidad), como de las características de las partículas sólidas (cantidad, tamaño, forma y dureza).

El fenómeno de cavitación, se debe a la formación de burbujas cuando la velocidad del agua es alta y se dan diferencias de presión entre el flujo y el vapor. Las burbujas se crean cuando la presión de vapor es mayor que la presión del flujo, estas burbujas viajan

hasta llegar a una zona de alta presión de flujo, en donde estallan bruscamente generando una onda explosiva que produce picaduras y cavidades en el concreto. Este fenómeno es propio de conducciones, túneles, vertederos, disipadores de energía y presas de concreto.

### 3. Físicos

Las acciones físicas que experimenta el concreto, específicamente los cambios de humedad y temperatura, presentan como principal manifestación los cambios volumétricos que provocan fisuras o agrietamientos. Estas fisuras afectan la masa, el peso unitario, la porosidad, la permeabilidad y por consiguiente la resistencia del elemento estructural.

#### a) Fisuras por cambios de humedad

Las fisuras que se producen por la presencia alterna de humedad del entorno, tienen la característica que atraviesan la pasta de cemento y no al agregado.

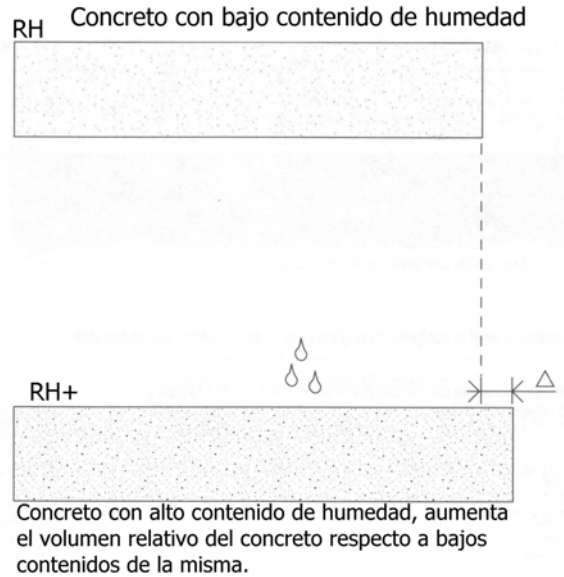
En estructuras que se encuentren en contacto con agua, principalmente obras hidráulicas, como pilotes o fundaciones de puentes, embalses, presas y conducciones; pueden existir tres zonas de deterioro:

1. El área del elemento que nunca se encuentra en contacto con el agua, puede sufrir cualquier tipo de patología por la acción de sustancias ambientales agresivas (ácidos, sales, microorganismos) o por cambios de temperatura.

2. El área de la estructura que sufre un mayor deterioro, es la que se encuentra donde se producen los cambios de nivel del agua; ya que se combinan los efectos de las acciones de la primera zona y el microfisuramiento producto de los ciclos de humedecimiento y secado, complicados por la acción erosiva de las corrientes de agua y la aspersion.

3. La zona que se encuentra permanentemente sumergida en el agua puede padecer patologías dependiendo de la permeabilidad y porosidad del elemento de concreto y de las características químicas del agua que lo rodea.

En la figura 2.11. se muestra los efectos de los cambios volumétricos causados por la humedad.



**Figura 2.11. Esquema de deterioro causado por cambios de humedad**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

b) Fisuras por cambios de temperatura

Las fisuras producidas por los cambios de temperatura, generalmente afectan tanto la pasta de cemento como los agregados. Entre los mecanismos de daño producidos por cambios bruscos de temperatura (mayores a 20°C, según Sánchez, 2002), se pueden considerar los siguientes:

- Dilatación y contracción por cambios diarios de temperatura:

El concreto al igual que la mayoría de materiales, se expande cuando la temperatura aumenta y se contrae cuando disminuye. El gradiente de temperatura que produce estos efectos, se presenta en regiones donde la radiación solar es intensa por la mañana y en la noche o tarde se presentan vientos o lluvia que bajan las temperaturas ambientales.

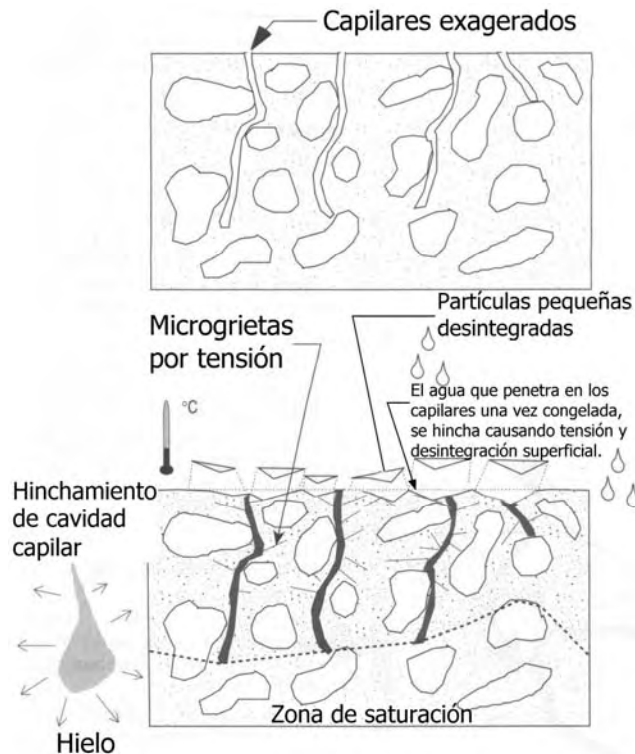
Si el elemento estructural es lo suficientemente esbelto, puede experimentar el fenómeno de alabeo, ya que en donde se tiene una mayor temperatura se presentan esfuerzos de tensión, mientras que en donde se tiene una menor temperatura el elemento se comprime. Este fenómeno se presenta comúnmente en pisos, pavimentos y muros esbeltos, en donde se observan agrietamientos por tracción.

- Ciclos de hielo y deshielo:

Se presentan tanto en lugares en donde hay una estación de invierno con heladas, como dentro de cámaras de congelación (cuartos fríos de supermercados o industrias).

Los daños en la matriz de concreto se agravan conforme el cambio de temperatura sea mayor y la saturación del material supere el 85%; esto al tomar en cuenta que el mecanismo de falla, se presenta cuando el agua que esta dentro de los poros se congela y aumenta su volumen aproximadamente en un 9%, provocando esfuerzos de tracción entre la pasta y el agregado, los cuales producen el agrietamiento a lo largo de la profundidad del elemento y la delaminación superficial. En la figura 2.12. se muestra un esquema del deterioro provocado por ciclos de hielo y deshielo.

Los agregados gruesos con alta absorción y porosidad se saturan fácilmente con el agua que proviene del exterior, lo cual contribuye al deterioro del concreto, ya que sufren cambios de volumen internos (igual que la matriz de cemento) que provocan que el agregado se desintegre.



**Figura 2.12. Esquema de deterioro causado por ciclos de hielo y deshielo**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

- Ataque por fuego:

La resistencia mecánica del concreto se puede ver seriamente afectada por la acción del fuego, al dañar la estructura por la descarbonatación y el aumento de porosidad por microfisuramiento.

En cualquier incendio que se alcancen temperaturas superiores a los 300°C, se producen en los elementos de concreto un descenso en la resistencia y en el módulo de elasticidad y un aumento en las deformaciones. Además, el agua aplicada rápidamente por los bomberos, produce humedad excesiva que acelera el proceso de agrietamiento y los descascaramientos superficiales.

En el esquema de la figura 2.13. se observa la magnitud del daño estructural, depende de la temperatura alcanzada en el incendio.

RANGO TEMPERATURA (°C)	COLORACIÓN SUPERFICIAL	DAÑO
0 – 300	Gris natural	<b>Calcinación incipiente:</b> Microfisuras y mapeo superficial
300 – 600	Rosado	<b>Calcinación superficial:</b> Fisuración térmica por alabeo y descarbonatación superficial
600 – 900	Gris claro	<b>Calcinación avanzada:</b> Descarbonatación profunda y pérdidas de masa por descascaramiento
> 900	Blanco o amarillo claro	<b>Calcinación muy avanzada:</b> Descarbonatación avanzada y pérdida de masa

**Figura 2.13. Esquema temperatura, color y daño en el concreto por incendio**

Fuente: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

#### 4. Biológicos

La presencia de organismos y microorganismos de origen vegetal o animal en la superficie de una estructura de concreto, no solo afecta la estética de la obra, sino que puede producir daños y deterioros físicos, mecánicos, químicos y biológicos.

Por ejemplo, la vegetación y los microorganismos asociados a la misma, pueden retener y generar humedad (ciclos de humedecimiento y secado), además las raíces pueden penetrar y crecer dentro de los poros del concreto causando grietas por las fuerzas de expansión internas. En el desarrollo de la vida de las plantas y microorganismos, se generan sustancias que pueden causar ataques químicos, como los ácidos húmicos y sales producto de la descomposición vegetal.

Las condiciones que favorecen el establecimiento y desarrollo de microorganismos de origen vegetal y animal, son las siguientes:

- La presencia de agua: cualquier tipo de vida necesita la presencia de agua para desarrollarse. El agua puede provenir tanto del medio ambiente, como de los poros del concreto.

- La disponibilidad de nutrientes: algunos gases contaminantes producto de procesos de combustión se constituyen en alimento para bacterias y hongos. Además, la cal y algunos minerales del concreto, son fuente de nutrientes para ciertos microorganismos.

- Condiciones ambientales: las bacterias aeróbicas requieren concentraciones de oxígeno superiores a 1 g/l, mientras que las anaeróbicas requieren apenas 0,1 g/l de oxígeno. La temperatura ambiental entre 20 y 35°C y la humedad relativa superior al 80%, favorece el desarrollo de bacterias.

- Superficie de colonización: se facilita la creación de colonias de microorganismos en superficies rugosas o ásperas, que ofrecen la posibilidad de anclaje.

Algunas obras civiles se distinguen por la presencia de agua, nutrientes, condiciones ambientales de temperatura y humedad, que facilitan la proliferación de microorganismos. Entre las estructuras mencionadas, se encuentran las relacionadas con la industria de alimentación, sistemas de tratamiento de aguas residuales, procesamiento de materia orgánica y almacenamiento de hidrocarburos.

El principal mecanismo de meteorización y deterioro de origen biológico es el ataque que producen las sustancias ácidas provenientes de la acción metabólica de los microorganismos y los productos de la degradación de hidrocarburos.

Los ácidos disuelven la pasta de cemento y algunos agregados, además favorecen la corrosión del acero de refuerzo. Entre las sustancias agresivas producto del metabolismo de

las bacterias, se tienen: el ácido sulfúrico, nítrico, cítrico, acético y húmico. Algunos microorganismos, tienen la capacidad de oxidar los hidrocarburos en medios acuosos, produciendo dióxido de carbono, metano, sales solubles, benceno, tolueno, hierro reducido y ácido acético.

En la tabla 2.3. se muestra específicamente el tipo de microorganismo y la acción de deterioro generada sobre las secciones de concreto.

**Tabla 2.3. Microorganismos y acciones sobre el concreto**

MICROORGANISMOS	ACCIONES
Bacterias	La mayoría necesita CO <sub>2</sub> para sus procesos metabólicos y excretan ácidos orgánicos, oxidan el azufre en sulfato, el cual se mezcla con el cemento para formar sulfato de calcio que produce ataque de sulfatos en el concreto. Además, forman nitratos, ácido sulfúrico, ácido acético y gas sulfhídrico causante de corrosión del acero.
Hongos	Los hongos son vegetales inferiores abundantes en el suelo y aire. Producen daños mecánicos por el agrietamiento que causa el crecimiento de raíces dentro del concreto, además de ataque de ácidos orgánicos y formación de manchas y moho.
Algas, líquenes y musgos	Son organismos vegetales (plantas) relacionadas con medio acuático. Utilizan el calcio y magnesio del cemento como alimento, generan grietas y fisuras que facilitan la entrada de sustancias agresivas.

**Fuente:** Adaptado de Piedrahita (2004) y de Sánchez De Guzmán (2002)

El fenómeno de bioerosión, es un mecanismo de deterioro que se da en el caso específico del medio marino y es causado básicamente por tres organismos biológicos:

- Microorganismos endolíticos (líquenes): penetran el concreto hasta 1 mm atacándolo químicamente.
- Organismos bioabrasionadores (moluscos): capaces de realizar una abrasión superficial en toda la sección de concreto.
- Organismos bioperforadores: generan cavernas mediante la combinación de la acción química y mecánica, debilitando la estructura y dando paso al agua de mar dentro de la estructura.

Estos organismos aceleran el proceso de carbonatación propio de una estructura marina.

### 3.2.2. Agentes Internos

#### 1. Reacción álcali – agregado (RAA)

En el año 1940, el norteamericano Thomas Stanton, demostró que ciertos agregados reaccionaban internamente con la pasta de cemento, provocando degradación, expansión y agrietamiento de los elementos de concreto. Se estableció que el fenómeno se da en cementos con altos contenidos de álcalis (óxidos de sodio y potasio), por lo que se le dio el nombre de álcali – agregado.

Para que se presente la reacción se tiene que dar cierta concentración de álcalis (NaOH y KOH) en los poros del concreto, sumado a la reactividad de los minerales de los agregados y a la condición de humedad del concreto. Por lo tanto, existen altas posibilidades que ocurra una reacción álcali – agregado, en un concreto con alta concentración de álcalis, constituido por agregados reactivos y expuestos a un ambiente húmedo.

En la tabla 2.4. se muestran los agregados y minerales potencialmente reactivos al álcalis del cemento.

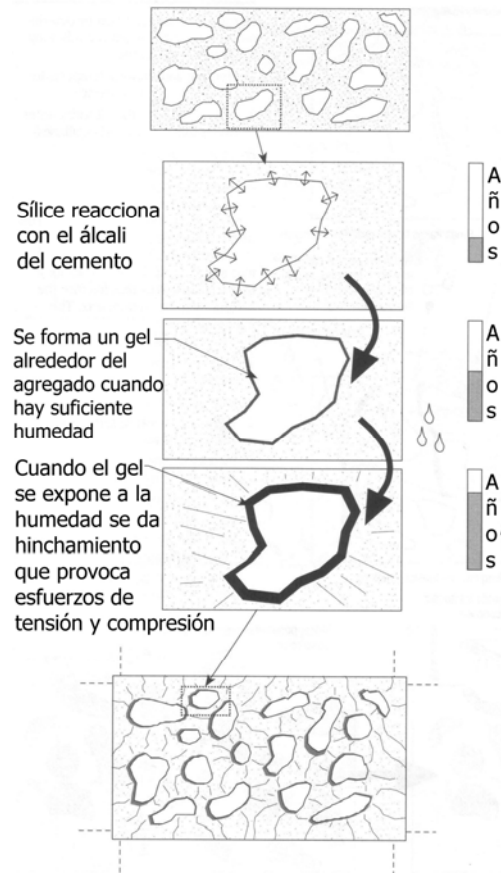
**Tabla 2.4. Algunos agregados y minerales potencialmente reactivos**

AGREGADOS	MINERALES
Vidrios volcánicos	Cuarzo
Riolitas	Ópalo
Latitas	Calcedonia
Dacitas	Tridimita
Areniscas	Cristobalita
Calizas dolomíticas	Andesita
Filitas	Heulandita
Gnesis	Dolomita

**Fuente:** Sánchez De Guzmán (2002)



En la figura 2.14. se muestra un esquema del deterioro causado por la reacción álcali - agregado.



**Figura 2.14. Esquema de deterioro causado por la RAA**  
Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

Entre las reacciones álcali – agregado, se distinguen tres tipos:

#### Álcali – Sílice

Algunos tipos de agregados contienen sílice reactivo, el cual forma silicatos alcalinos (gel silicoso) en la pasta del cemento, capaces de absorber agua a través de ósmosis, ejerciendo grandes presiones en los poros del concreto, causando fisuras por expansión. Los factores que definen la velocidad del fenómeno son: la humedad, la temperatura, la cantidad y granulometría de los agregados reactivos y la concentración de álcalis en los poros del concreto.

### Álcali – Carbonato

Los agregados calizos del tipo dolomita, producen brucita y ciertos álcalis que expuestos a la humedad, aumentan de volumen induciendo esfuerzos internos de tracción dentro del concreto, ocasionando fisuras y agrietamiento.

#### c) Álcali – Silicato

Ciertas rocas sedimentarias con altos contenidos de arcillas compuestas por capas de silicatos, producen una expansión lenta en el concreto.

### 2. Formación de etringita diferida (FED)

Es una reacción sulfática interna, capaz de afectar el concreto sin necesidad de requerir una fuente externa de sulfatos, en algunos casos se asocia con la reacción álcali – agregado (RAA).

La FED provoca una expansión severa cuando el concreto está endurecido, que genera un agrietamiento alrededor de los agregados. La principal manifestación de la FED son grietas en forma de mapa en la superficie del elemento estructural.

Durante el proceso de hidratación del concreto es normal que se presente la formación de etringita (sulfoaluminato de calcio), la cual genera expansión en el estado plástico del concreto.

Según el estudio de Divet (2003) de cinco obras masivas de concreto, la FED se podría presentar cuando se tienen los siguientes factores:

- La temperatura del concreto excede los 60 °C durante el colado
- El elemento de concreto es masivo (muros, pilas y losas de puentes)
- Utilización de cemento con alto contenido alcalino ( $SO_3$ ,  $C_2S$  y  $C_3A$ )
- Las condiciones de temperatura y humedad ambiental elevada
- Emplear agregados contaminados con piritas que poseen contenidos elevados de sulfatos

### 3. Contracción por secado

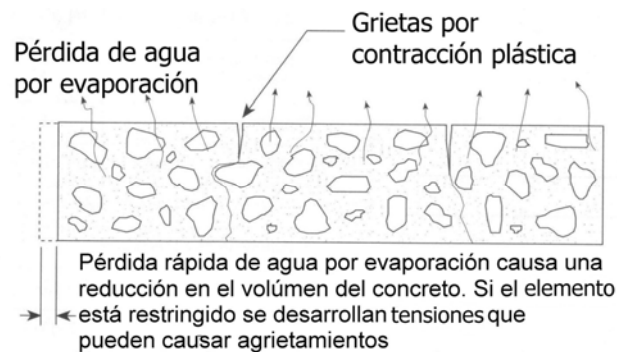
La contracción por secado, se conoce como retracción hidráulica y consiste en la disminución de volumen del concreto endurecido, cuando la mayor parte del agua

evaporable de la mezcla se libera. La contracción de un concreto normal, varía entre 0,2 y 0,7 mm por metro lineal.

La evaporación depende de factores externos al concreto, tales como: la velocidad del viento, la temperatura y la humedad del ambiente; también de las condiciones de curado. Sin embargo, también depende de factores propios de la composición del concreto, tales como:

- Contenido de cemento: un concreto con una excesiva cantidad de cemento, presenta una mayor dilatación y contracción.
- Cantidad de agua: a mayor contenido de agua de mezclado, mayor será el agua evaporable durante el fraguado y mayor es la contracción del concreto, generando un concreto poroso y muy permeable.
- Naturaleza del agregado: el agregado compacto, rugoso y duro como los granitos y algunas calizas, generan una interfase de adherencia entre la pasta y el agregado, que logra controlar la contracción. Mientras que los agregados como las pizarras y areniscas, absorben el agua y producen contracciones de dos a tres veces mayores que las de un concreto normal.

En la figura 2.15. se muestra un esquema de la contracción por secado en un elemento de concreto.



**Figura 2.15. Esquema de contracción por secado en el concreto**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

# **CAPITULO 3**

## **DETECCIÓN Y TRATAMIENTO DE PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS EN SERVICIO**

### **1. INTRODUCCIÓN**

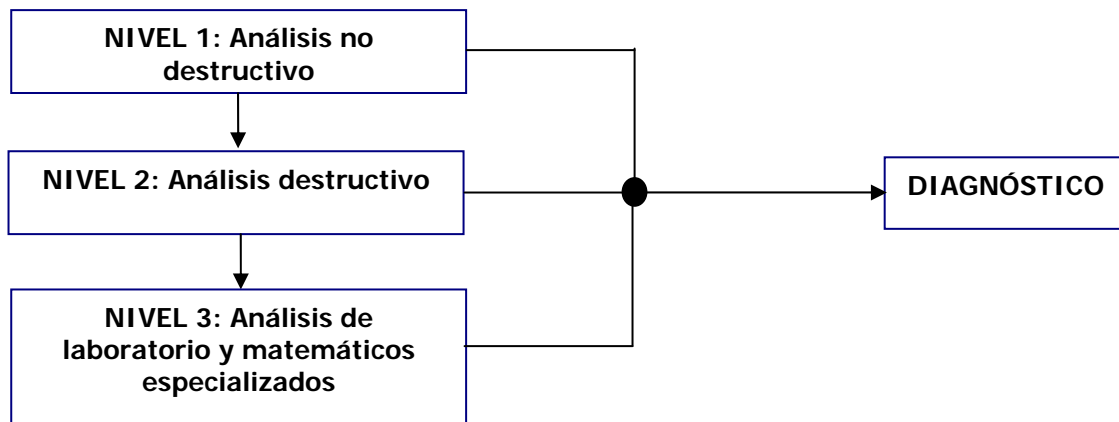
En este capítulo se presenta el conjunto de procedimientos necesarios para detectar y tratar las patologías en sistemas de concreto estructural en servicio. En primer lugar, se propone el Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías. En segundo lugar, se muestran los aspectos relacionados con diseño correctivo por durabilidad al describir especificaciones para cada uno de los deterioros provocados por agentes externos e internos. El tercer apartado, trata el procedimiento paso a paso para definir el sistema de reparación, tomando en cuenta el tipo de patologías encontradas en el diagnóstico y las especificaciones por durabilidad para cada caso en particular. En cuarto lugar, se explican los aspectos que deben ser controlados para asegurar la calidad de la reparación o reconstrucción. Por último, se presentan recomendaciones de mantenimiento y protección contra las patologías provocadas por agentes externos relativos a la influencia del microclima que rodea a la estructura.

### **2. DIAGNÓSTICO (MÉTODO DE TRES NIVELES)**

El diagnóstico se define como la localización de los mecanismos de daño y la identificación de las patologías en las estructuras de concreto. El diagnóstico se complementa con un pronóstico del comportamiento futuro de la estructura, considerando las condiciones de servicio y los tipos de intervención o reparación a ejecutar.

Para realizar un diagnóstico se debe seguir de manera sistemática los pasos de una investigación. En la figura 3.1. se presenta un esquema del Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías de concreto. El procedimiento propuesto se basa en tres niveles o etapas de investigación, cada nivel se retroalimenta de la información generada en el nivel anterior, hasta alcanzar un diagnóstico aceptable. Este procedimiento es una adaptación del método para analizar la estabilidad de cauces propuesto por el Instituto Nacional de

Carreteras (National Highway Institute – Federal Highway Administration) (1999) y tomando en cuenta la guía de evaluación ACI 364 (1999).

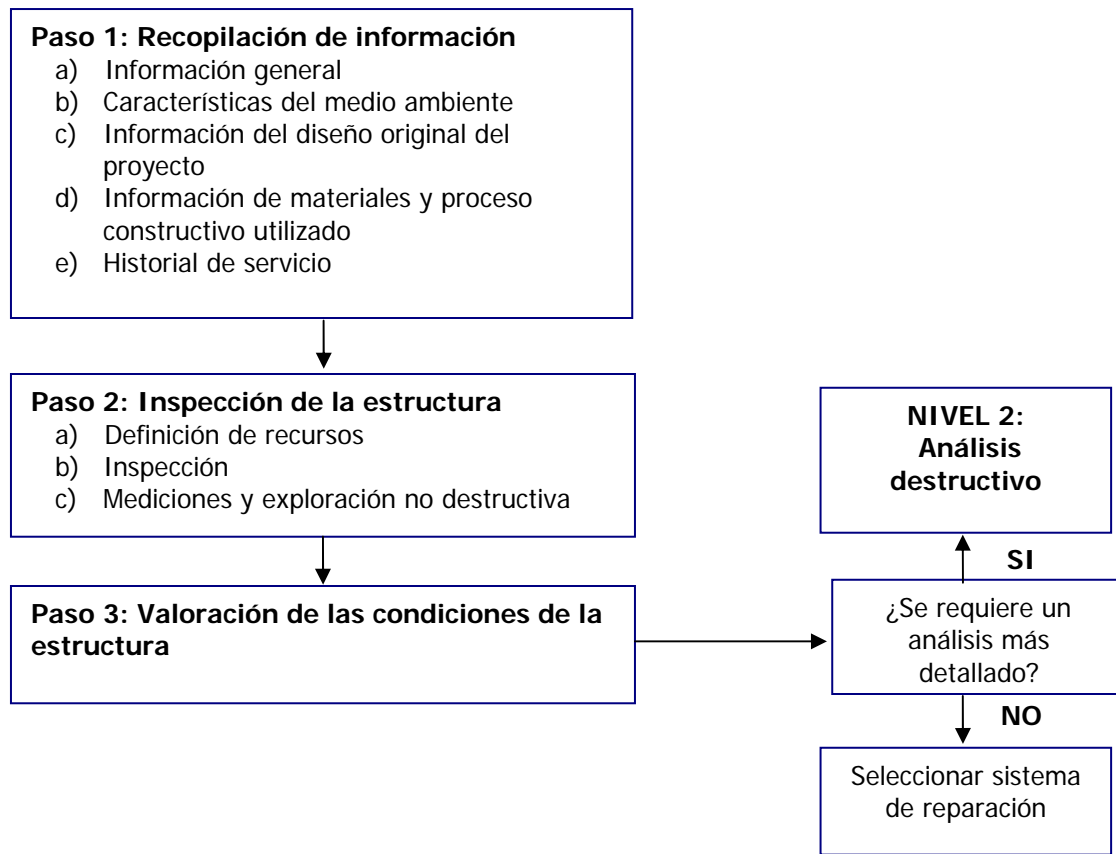


**Figura 3.1. Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías en sistemas de concreto estructural en servicio**

### **2.1. Nivel 1: Análisis no destructivo**

El análisis no destructivo se basa en los resultados de la aplicación de pruebas y ensayos en sitio del tipo no destructivo. Este análisis sirve como base para los siguientes niveles del procedimiento de diagnóstico. Si la información recopilada en este nivel no es suficiente para generar conclusiones sobre las patologías y recomendaciones de diseño y reparación, se procede con pruebas destructivas (Nivel 2).

La investigación del análisis no destructivo, incluye la recopilación de información sobre el diseño y construcción de la estructura, del medio ambiente que la rodea y del historial de servicio; para luego continuar con una inspección de la obra y por último hacer una valoración de las condiciones de la obra. En la figura 3.2. se muestra el orden de los pasos a seguir en el Nivel 1.



**Figura 3.2. Nivel 1: Análisis no destructivo**

A continuación se describen las secciones que conforman el análisis no destructivo:

### **1. Paso 1: Recopilación de información**

#### Información general

- Nombre de la obra.
- Localización de la estructura.
- Sistema estructural y de cimientos.
- Propietarios.
- Fecha de diseño, construcción y puesta en servicio.
- Diseñadores, consultores y constructores del proyecto.

#### Características del medio ambiente

- Humedad relativa, presión, régimen de lluvia y vientos.

- Temperatura (temperaturas extremas y exposición solar).
- Características básicas del agua presente en la región.
- Identificación de sustancias agresivas (estado, tipo y concentración).
- Tipo de contacto entre los elementos y las sustancias agresivas (inmersión, escorrentía, salpicaduras, vapor).
- Frecuencia y duración de la exposición a agentes agresivos.

#### Información del diseño original del proyecto

- Estudio preliminares: suelos, hidrológicos, geológicos y topográficos.
- Memorias de cálculo estructural y civil.
- Planos arquitectónicos, estructurales y electromecánicos.
- Especificaciones constructivas y de materiales.
- Normativa de diseño empleada.

#### Información de los materiales y proceso constructivo utilizados

- Verificar la calidad de los materiales especificados en diseño y utilizados en obra.
- Revisar las características de los recubrimientos o tratamientos superficiales utilizados.
- Investigar en los registros de los profesionales responsables de la inspección de obra, sobre las características del concreto, el acero y los aditivos utilizados.
- Analizar detalladamente los siguientes documentos: el cuaderno de bitácora de obra, fotografías de situaciones especiales durante la construcción, reportes técnicos y observaciones del inspector, planos de taller y de modificaciones de elementos estructurales.

#### Historial de servicio

- Realizar entrevistas con los encargados de mantenimiento de la obra, para ubicar espacial y cronológicamente las manifestaciones de daño.
- Caracterizar los usos de la estructura.

- Buscar evidencias documentales de reparaciones, remodelaciones y eventos operativos inesperados y desastres como: geológicos, sísmicos, geotécnicos, atmosféricos, sobrecargas, fuego y explosiones.
- Determinar las características de los procesos operativos, principalmente: abrasivos, erosivos, cambios de humedad, temperatura y contacto con sustancias agresivas.
- Revisar el contenido de informes o estudios de durabilidad, vulnerabilidad y patología que se hallan realizado con anterioridad.

## **2. Paso 2: Inspección de la estructura**

### Definición de recursos

- Definir los recursos humanos adecuados para realizar el análisis e inspección en sitio; tales como: personal especializado en servicios de topografía, técnicos de laboratorio y manejo de equipo y operadores de maquinaria.
- Definir el tipo de equipo a utilizar en la inspección de acuerdo a las condiciones del sitio.
- Determinar el periodo de tiempo en el que se puede llevar a cabo el análisis sin provocar interrupciones en la operación o incomodidades a los usuarios del inmueble.
- Conocer la disponibilidad de agua y energía eléctrica.

### Inspección

El objetivo de la inspección es el de identificar y ubicar los elementos que presentan cualquier irregularidad o se encuentran afectados por algún mecanismo de daño. Para la ubicación efectiva de los elementos y determinar la severidad de los daños, es necesario realizar un levantamiento fotográfico exhaustivo, utilizando como base los planos de la estructura.

- Determinar el requerimiento de permisos especiales y documentos para el ingreso de equipo y la remoción de los elementos mencionados en el punto anterior.
- Identificar y ubicar los principales fenómenos patológicos en los elementos de concreto, tales como:
  - Desplomes o inclinaciones
  - Planos de falla y fisuras o agrietamientos



- Cambios de aspecto de la masa de concreto
- Deflexiones
- Aplastamientos
- Erosión
- Descascaramientos o delaminaciones
- Polvo y cristalización en las superficies
- Ablandamiento o pérdida de rigidez
- Hinchamientos o expansiones
- Decoloración y manchas (eflorescencias)
- Meteorización y lixiviación por fluidos
- Corrosión del acero de refuerzo u otros metales embebidos
- Deterioros biológicos

- Describir las condiciones de carga que soportan los elementos estructurales. Esto incluye la ubicación de los puntos de transmisión de las cargas gravitacionales, impuestas o vivas, impactos, vibraciones y cargas dinámicas.

- Identificar el patrón de comportamiento de las grietas.

- Registrar las deflexiones y deformaciones en los elementos estructurales.

- Identificar los asentamientos diferenciales del suelo circundante a la infraestructura.

- Registrar las filtraciones, derrames y defectos en los sistemas de conducción de agua o cualquier otra sustancia.

- Documentar detalladamente evidencias que muestren deficiencias en los procedimientos de operación y mantenimiento de la infraestructura.

#### *Mediciones y exploración no destructiva*

Consiste en realizar las mediciones respectivas de cada fenómeno observado y documentado en la inspección. Entre las manifestaciones más importantes que se deben medir se encuentran las siguientes:

- La longitud de las luces y desplazamientos, los ángulos de inclinaciones y el ancho, profundidad y longitud de fisuras, desniveles, asentamientos y deformaciones.

- Dimensión y ubicación de las zonas que presentan manchas, delaminaciones, descascaramientos, erosión, lixiviación, eflorescencias, cultivos biológicos y meteorización en general.

Cuando la magnitud de las manifestaciones de daño no es evidente, se procede a realizar una exploración de la estructura, removiendo algunas porciones superficiales de concreto que se encuentran en las zonas que presenten algún tipo de deterioro.

El equipo básico a utilizar en las mediciones y la exploración es el siguiente:

- Cinta métrica, comparador de fisuras, Vernier
- Nivel de mano, plomadas, tacos, clavos, marcadores
- Frascos y bolsas con cierre hermético
- Lupa, binóculos, linterna
- Cámara fotográfica o de video
- Grabadora de audio
- Espátulas, piqueta, cepillo de acero y de plástico, trapos

Según el ACI 228.2R-98, los ensayos del tipo no destructivo proveen información importante sobre el desempeño estructural y la durabilidad del concreto, tal como: dimensiones de miembros, localización de grietas y delaminaciones, grado de consolidación, presencia de vacíos (hormigueros), localización y tamaño del acero de refuerzo y extensión de las áreas afectadas por hielo y deshielo, fuego y ataque químico. Entre los principales métodos de ensayo no destructivo se tiene:

- Impacto acústico con martillo: se escucha el sonido que despide el elemento estructural al ser golpeado por el martillo, con lo que se determinan fácilmente las discontinuidades en la masa de concreto (vacíos y delaminaciones), por lo tanto es un indicador de uniformidad.

- Localizador de barras de acero: el Pachómetro es un equipo magnético que sin necesidad de remover el concreto, ubica el acero de refuerzo y estima tanto el recubrimiento como el calibre de la barra.

- Ultrasonido: los pulsos de las ondas ultrasónicas reflejan los defectos internos del elemento, tales como: grietas y pérdidas de sección del acero de refuerzo.
- Radar y rayos X: son dispositivos que localizan cualquier tipo de metal embebido dentro del concreto desde la superficie, es similar al ultrasonido excepto que utiliza pulsos electromagnéticos que hacen que los materiales se diferencien por sus propiedades dieléctricas.
- Impacto: el análisis de las frecuencias provocadas por las ondas de los impactos, permite la localización de defectos en la profundidad de los elementos de concreto, tales como: delaminaciones, vacíos por segregación y presencia de humedad.
- Martillo de rebote o esclerómetro (ASTM C805): es un instrumento que permite estimar la resistencia a la compresión y uniformidad del concreto, al comparar la lectura con las curvas de calibración del aparato. La precisión puede ser limitada.
- Pistola de Windsor (ASTM C808): es un ensayo similar al anterior, en donde se relaciona la resistencia a la penetración con la uniformidad y capacidad del elemento de concreto.
- Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597): utiliza curvas de calibración para proporcionar una aproximación de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, densidad y calidad del concreto.
- Radiografía Gamma: la intensidad de la radiación de energía electromagnética pasa a través del miembro de concreto y se graba en una película fotográfica, obteniéndose información sobre la densidad y solidez del concreto.
- Métodos de penetrabilidad: mide la tasa de flujo de un fluido (aire o agua) dentro del concreto en condiciones de ensayo controladas. Los resultados obtenidos se relacionan con características como la permeabilidad, porosidad y la difusión del concreto.
- Termografía infrarroja: la presencia de defectos a lo ancho de los elementos de concreto afectan las propiedades de conducción del material, por lo que si existen agrietamientos o vacíos se perciben diferencias de temperatura en la superficie del elemento, siempre y cuando se realice la prueba en condiciones ambientales controladas.
- Pruebas de carga: determina la capacidad residual de elementos de concreto.

### 3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura

A partir de los pasos anteriormente descritos, se valoran las siguientes condiciones de la estructura:

- La capacidad estructural de los miembros para soportar las condiciones actuales de uso y carga. Determinar si la estructura cumple con las especificaciones de la normativa estructural y sismo resistente vigente. Establecer si los daños encontrados implican riesgos estructurales que se deben corregir a corto plazo.
- La necesidad de realizar un análisis destructivo de los mecanismos de deterioro (Nivel 2), ya que la información recopilada en la primera etapa de estudio no es concluyente para brindar un diagnóstico satisfactorio porque las manifestaciones no se pueden asociar específicamente con alguna patología, sino que se trata de una combinación de factores.

#### 2.2. Nivel 2: Análisis destructivo

La ejecución del Nivel 2 depende de los resultados de valoración de las condiciones de la estructura (Paso 3 del Nivel 1). Al determinarse la necesidad de un análisis más detallado, se procede a estudiar las características de los mecanismos deterioro, empleando métodos de medición y ensayos de carácter destructivo, tomando como base la información generada en el Nivel 1. En la figura 3.3. se muestra el orden de los pasos requeridos para ejecutar el Nivel 2.

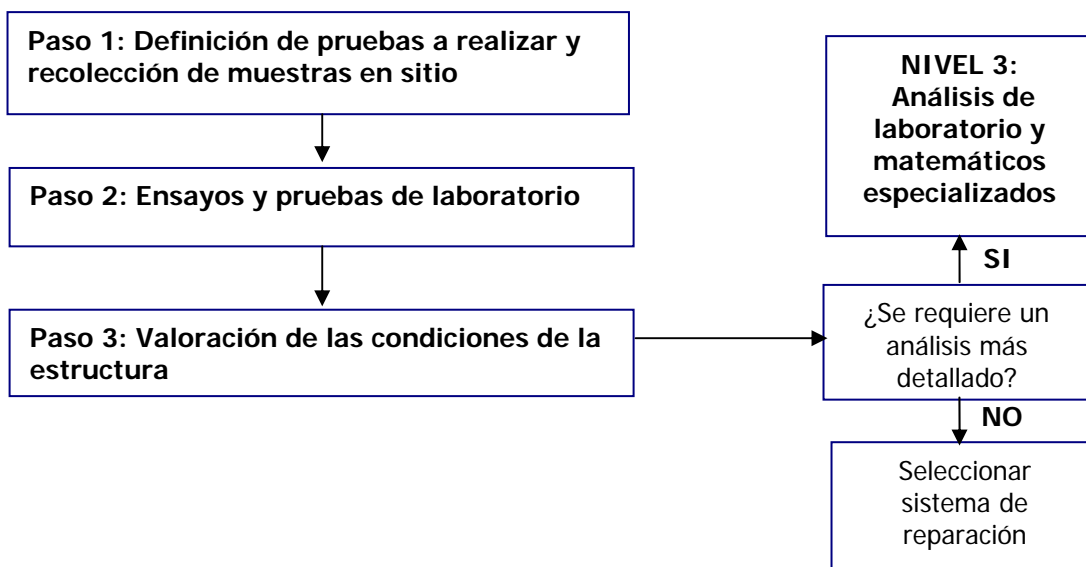


Figura 3.3. Nivel 2: Análisis destructivo

A continuación se describen los pasos del análisis destructivo:

### **1. Paso 1: Definición de pruebas a realizar y recolección de muestras en sitio**

La localización de los puntos de muestreo depende de la variación de las características del patrón de daños, el tamaño de la estructura y la desviación entre los resultados del ensayo, por lo que se deben ubicar, de tal modo que sean suficientes para realizar ensayos y mediciones representativos de los diferentes fenómenos de deterioro.

Es necesario tomar muestras en las zonas que presenten indicios de cualquier tipo de: meteorización, eflorescencia, mancha, cambio de color, delaminación, deformación y agrietamiento excesivo.

- Recolectar muestras de las sustancias que se encuentren en contacto con los elementos estructurales afectados por ataque químico, para determinar las propiedades físicas y químicas más importantes, entre las que se tiene: el estado (líquido, gaseoso o sólido), la composición, concentración, el potencial de hidrógeno (pH), la acidez, el periodo de contacto, la temperatura y la toxicidad.

- Extraer núcleos de concreto, con los cuales se puede determinar: el patrón de fisuras, el estado físico de la pasta y agregado, se pueden realizar pruebas de resistencia a la compresión y también de carácter petrográfico.

- Obtener muestras de polvo para realizar pruebas de carácter químico.

- Extraer probetas de acero de refuerzo para determinar propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Las pruebas de laboratorio a realizar se definen tomando en cuenta el análisis de los ensayos no destructivos (Nivel 1) y siguiendo las recomendaciones de evaluación del ACI 364 que se presentan en la tabla 3.1.

### **2. Paso 2: Ensayos y pruebas de laboratorio**

Las muestras recolectadas se utilizan para realizar ensayos de laboratorio de los siguientes tipos:

- Físicos: dimensiones, peso, densidad, absorción capilar, porosidad abierta y permeabilidad.

- Mecánicos: resistencia a la compresión, flexión y tracción.
- Químicos: contenido aproximado de cemento, determinación del frente de carbonatación, contenido de sales de sodio y potasio, contenido aproximado de sulfatos, difracción de rayos X.
- Biológicos: contenido aproximado de materia orgánica y cultivos microbiológicos para determinar tipo de organismos.
- Microscópicos: análisis petrográfico del concreto, análisis electrónico de contaminantes y microorganismos.

En la tabla 3.1. se muestran las pruebas básicas para evaluar el estado del concreto, según el ACI 364.

**Tabla 3.1. Procedimientos de evaluación de las propiedades del concreto**

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN											
	Contenido Aire ASTM C457	Contenido Cemento ASTM C1084	Prueba química	Núcleos ASTM C42	Potencial eléctrico	Resistividad Eléctrica	Flexión ASTM C42	Hielo-Deshielo ASTM C666	Humedad nuclear	Prueba permeabilidad	Análisis Petrográfico ASTM C856	Adherencia ASTM C900
Acidez			●								●	
Contenido de aire	●										●	
Álcali-Carbonato											●	
Álcali-Silice											●	
Contenido cemento		●	●								●	
Composición química			●								●	
Contenido de Cloruro			●	●							●	
Esfuerzo compresión				●								●
Contaminantes agregado			●								●	
Contaminantes del agua			●								●	
Corrosión del ambiente			●		●							
Agrietamiento				●								
Densidad				●								

Fuente: Adaptado del ACI 364.1R-94 (1999)

**Tabla 3.1. Procedimientos de evaluación de las propiedades del concreto  
(Continuación)**

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN											
	Contenido Aire ASTM C457	Contenido Cemento ASTM C1084	Prueba química	Núcleos ASTM C42	Potencial eléctrico	Resistividad Eléctrica	Flexión ASTM C42	Hielo-Deshielo ASTM C666	Humedad nuclear	Prueba permeabilidad	Análisis Petrográfico ASTM C856	Adherencia ASTM C900
Elongación				●								
Componentes congelados											●	
Módulo de elasticidad				●								
Módulo de ruptura				●		●						
Contenido de humedad				●		●		●				
Permeabilidad									●	●		
Esfuerzo adherencia												●
Calidad del agregado										●		
Resistencia a hielo-deshielo				●			●			●		
Solidez				●						●		
Resistencia a sulfatos			●							●		
Esfuerzo de tensión				●		●						
Uniformidad										●		
Relación A/C										●		

Fuente: Adaptado del ACI 364.1R-94 (1999)

### 3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura

Se evalúan las condiciones actuales de la estructura, según la información generada en el análisis de las pruebas de destructivas y no destructivas. Entre los aspectos a evaluar se tiene:

- Dimensiones y geometría de los elementos estructurales: se debe comparar las áreas de las secciones transversales críticas efectivas en sitio, con las secciones de diseño contenidas en los planos.
- Comportamiento de la estructura: teniendo en cuenta las dimensiones y las condiciones de los materiales, se procede a evaluar el comportamiento real de los elementos mediante métodos de análisis estructural.

- Materiales: se debe analizar los resultados de los ensayos de campo y laboratorio para identificar los componentes de la estructura críticos, que necesitan ser reparados.

Cuando aún no se pueda asociar los mecanismos de deterioro a una patología determinada y si la importancia de la obra civil es tal, que los costos de investigación no son significativos, se puede realizar un análisis de laboratorio especializado, aplicando modelos matemáticos y probabilísticos (Nivel 3).

### ***2.3. Nivel 3: Análisis de laboratorio y matemáticos especializados***

La aplicación de modelos especializados para el diagnóstico, está relacionado con los métodos de diseño por desempeño para garantizar la durabilidad, que se encuentran actualmente en desarrollo e investigación a nivel mundial. Estos modelos se tratan en el apartado 3.2. Los modelos de diagnóstico especializados, necesitan recursos técnicos probabilísticos, empíricos y experimentales, para obtener datos representativos que sustenten las relaciones entre el mecanismo de deterioro y el conjunto de variables internas y externas que lo producen. En la actualidad, en nuestro país, no se cuenta con los recursos mínimos necesarios para aplicar esta metodología, por lo que este nivel de investigación queda fuera del alcance de este proyecto.

## **3. DISEÑO CORRECTIVO POR DURABILIDAD**

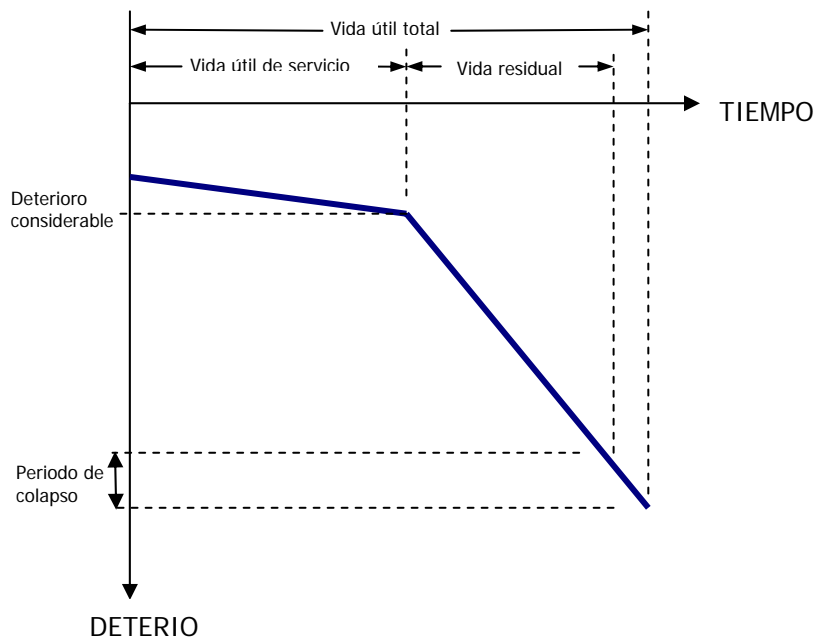
### ***3.1. Periodo de servicio de una estructura existente***

La vida útil de servicio es el periodo del tiempo durante el cual la estructura conserva las condiciones de seguridad, funcionalidad y estética previstas en el diseño, con un costo razonable de mantenimiento.

La vida útil última o total incluye el periodo de vida útil de servicio hasta el momento en que se presenta el colapso parcial o total de la estructura. Un colapso se puede dar por: disminución de la adherencia entre el refuerzo y el concreto, pérdida de sección de las barras de acero y pérdida de masa de las secciones por desintegración del concreto.

En la figura 3.4. se presenta una adaptación del modelo de vida útil propuesto en 1982 por Tuutti, en el que se observan las etapas de la vida de servicio de una estructura.





**Figura 3.4. Modelo de vida útil basado en el Modelo de Tutti**  
**Fuente:** Adaptado de Helene (2003)

La vida residual de una obra, inicia cuando la seguridad disminuye porque la demanda de cargas de servicio (estáticas y dinámicas) es mayor que la capacidad de los elementos. La funcionalidad de la estructura se ve disminuida al presentarse deformaciones excesivas, fisuras y pérdidas de masa; además, la presencia de manchas, eflorescencias, bacterias y hongos es inaceptable desde el punto de vista estético.

La vida útil está relacionada con el comportamiento de la estructura bajo los requerimientos ambientales y de servicio impuestos. Por lo tanto, depende del contacto que tengan los elementos con el microclima que los rodea y de las características tanto del medio ambiente como de los componentes de la masa de concreto.

### **3.2. Especificaciones de diseño por durabilidad**

Los códigos y la normativa sobre diseño por durabilidad actualmente se encuentran en desarrollo y actualización, en dicho proceso evolutivo de los códigos, se pueden distinguir tres etapas:

*1era Etapa. Diseño prescriptivo tradicional:* este tipo de normativa, se originó en Norteamérica y Europa antes de la década de 1990 y constituye la base de las especificaciones de durabilidad actuales. Consiste en la clasificación de la agresividad del medio ambiente, incluyendo las condiciones para la dosificación del concreto, los niveles

admisibles de sustancias agresivas que puede contener la mezcla, recubrimientos mínimos, agrietamiento permitido y condiciones de puesta en obra del concreto fresco.

*2da Etapa. Diseño prescriptivo avanzado:* Este diseño prescriptivo avanzado ha sido incorporado en los códigos a nivel internacional después de los años 90. Entre los principales códigos con diseño prescriptivo avanzado se tienen: el Código Modelo CEB - FIP, el Eurocódigo 2 y el ACI 318. En esta normativa se introducen algunos requisitos cuantificables de desempeño, tales como: la resistencia mecánica, la resistividad eléctrica, la absorción capilar y la permeabilidad a los fluidos.

*3era Etapa. Diseño por desempeño o prestacional para garantizar durabilidad:* se definen cuantitativamente los criterios relacionados con la vida útil requerida de una estructura, utilizando modelos matemáticos y probabilísticos, producto de la formulación científica basada en resultados de pruebas exhaustivas de los mecanismos de deterioro. El diseño prestacional actualmente se encuentra en desarrollo e implementación. A continuación en la tabla 3.2. se mencionan algunos ejemplos de modelos en desarrollo a nivel mundial:

**Tabla 3.2. Algunos ejemplos de modelos especializados para el estudio de estructuras existentes**

MODELO	AUTORES
365.1R-00: Predicción de vida de servicio (Service Life Prediction): emplea metodologías de evaluación de las condiciones y propiedades físicas del concreto existente	Comité ACI 365
* Analítico – numérico para encontrar el deterioro por envejecimiento de una estructura usando criterios viscoelásticos de falla y degradación	Oliveira y Creus. Federal University of Rio Grande do Sul - Brasil
* Modelo computacional que calcula un "módulo de elasticidad envejecido" según la fluencia, fisuración y relajación de las armaduras	Gandarillas y Cox. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho - Bolivia

\* Fuente: fib (2005)

## 1. Especificaciones generales para el diseño de mezclas de concreto

El diseño de mezclas de concreto, tanto para reparación de estructuras existentes como para estructuras nuevas, depende de propiedades y características de los componentes utilizados, de las necesidades específicas que introduce el ambiente de cada

proyecto, de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado.

Para garantizar concretos durables en cualquier medio ambiente, las mezclas deben cumplir ciertos requisitos básicos, entre los cuales se encuentran:

- Dosificar el concreto por peso y realizar correcciones por humedad de los agregados.
- Controlar la relación A/C (preferiblemente utilizar  $A/C \leq 0,50$ ).
- Controlar las cuantías mínimas de cemento.
- Utilizar agregados con granulometrías continuas y con baja relación de vacíos.
- Verificar la calidad y las características de los agregados, del agua de mezclado y del cemento.
- Utilizar el menor revenimiento posible, que permita un adecuado manejo y colocación del concreto.
- Diseñar el concreto utilizando el mayor tamaño nominal de agregado grueso que sea compatible con las dimensiones de la estructura y la configuración del acero de refuerzo.
- Controlar la temperatura del concreto fresco, ya que en el momento de iniciar la colocación debe tener una temperatura inferior a los 35 °C. Por lo que se debe colocar y compactar dentro de los 45 minutos posteriores a la producción.

A continuación, se presentan especificaciones del tipo prescriptivo avanzado para cada uno de los mecanismos de deterioro expuestos en el capítulo 2.

## **2. Especificaciones para deterioros provocados por agentes químicos**

### Ataque de ácidos

- Se prefieren los cementos con menor contenido de  $C_3S$ , para que se libere menos cantidad de cal libre soluble.
- Se deben construir elementos con baja permeabilidad y porosidad, por lo que se tienen que usar mezclas con una baja relación A/C y alta compactación. Se pueden utilizar densificantes a base de microsilica.

### Corrosión del acero de refuerzo

- Utilizar concretos con bajas relaciones A/C.
- Compactar y vibrar el concreto sin provocar segregación.
- Limitar el ancho de fisuras y juntas.
- Controlar la cantidad de ión cloruro (Cl-) aportado por los componentes del concreto (cemento, agua, agregados y aditivos). Según el apartado 4.4.1. del ACI 318-02, la concentración máxima de cloruro en un concreto reforzado expuesto a sustancias con Cl- es de 0,15% del peso de cemento; esto medido entre los 28 y 42 días de edad siguiendo la prueba ASTM C1218.
- Emplear aditivos a base de nitritos los cuales mitigan el ataque del cloruro.
- Garantizar recubrimientos adecuados del acero de refuerzo para elementos de concreto en contacto con suelo, agua y aguas residuales, ver tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Recubrimiento mínimo del acero de refuerzo en elementos de concreto a la intemperie**

ELEMENTO DE CONCRETO REFORZADO COLADO EN SITIO	RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm)
<b>Losas</b>	
Barra de la N°6 a la N°18	50,0
Barra inferior o igual a la N°5	37,5
<b>Columnas y vigas</b>	
Aros	50,0
Refuerzo principal	62,5
<b>Muros</b>	50,0
<b>Cimientos</b>	
Parte inferior	75,0

Fuente: Adaptado de tabla 3.3.2.3 del ACI 301 (2005)

### Ataque de sulfatos

- Utilizar un concreto resistente a sulfatos, es decir, con bajo contenido de  $C_3A$  y una relación  $C_3A/SO_3$  inferior a 3.
- Limitar el contenido de hidróxido de calcio, adicionando puzolanas como la ceniza volante, escorias de alto horno, metacaolín, microsílíce, ya que la expansión longitudinal se disminuye tres veces al utilizar estos compuestos.

- Los requerimientos para concretos expuestos a soluciones que contienen sulfatos se resumen en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4. Requisitos para concreto expuesto a soluciones con sulfatos**

GRADO DE EXPOSICIÓN	SO <sub>4</sub> SOLUBLE EN AGUA, EN EL SUELO (PORCENTAJE POR PESO)	SO <sub>4</sub> EN AGUA (PPM)	TIPO DE CEMENTO	MÁXIMA A/C POR PESO	MÍNIMA f'c (MPa)
Despreciable	0,00 – 0,10	0 – 150	-	-	-
Moderada	0,10 – 0,20	150 – 1500	II, MS	0,50	28
Severa	0,20 – 2,00	1500 – 10000	V	0,45	32
Muy severa	Más de 2,00	Más de 10000	V más puzolana	0,45	32

**Fuente:** ACI 318-02 sección 4.3.1 (2002)

- La AATH (2001) menciona que el CIRSOC 201-2001, especifica para exposición moderada a sulfatos: A/C máxima de 0,50 y f'c mínima de 30-35 MPa. Para severa: A/C máxima de 0,45 y f'c mínima de 35-40 MPa. Para muy severa: A/C máxima de 0,40 y f'c mínima de 40-45 MPa.

#### Carbonatación

- El concreto del recubrimiento debe tener baja permeabilidad mediante una baja relación A/C, adecuada compactación (sin segregación de mezcla) y curado eficiente. Se pueden adaptar las especificaciones para ataque de ácidos y corrosión de acero de refuerzo.

### **3. Especificaciones para deterioros provocados por agentes mecánicos**

#### Sobrecargas

- Las fisuras provocadas por los esfuerzos de tracción se deben controlar mediante la cantidad y colocación adecuada del acero de refuerzo, siguiendo la normativa de diseño estructural vigente.

- Para controlar las fisuras que favorecen la penetración de sustancias agresivas dentro del concreto, se especifican los anchos tolerables según la condición de exposición, ver tabla 3.5.

**Tabla 3.5. Ancho tolerable de grietas en superficies de concreto**

CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN	ANCHO TOLERABLE (mm)
Aire seco o con protección	0,40
Ambiente húmedo o saturado	0,30
Presencia de agentes químicos	0,20
Humedecimiento y secado de agua de mar	0,15

Fuente: Sánchez de Guzmán (2002)

Impactos y vibración

- Las fracturas por vibraciones e impactos pueden ser controladas mediante el uso de micro o macro refuerzo conformado por fibras de nylon, polipropileno o metálicas.
- Además, se debe procurar construir elementos cuya configuración logre que la relación entre la frecuencia natural de la estructura ( $f_e$ ) y la frecuencia de la fuente ( $f_f$ ), se encuentre fuera del intervalo entre 0,5 y 1,5; o sea  $\frac{f_e}{f_f} \notin [0,5, 1,5]$ .

Abrasión

- Para pisos que sufren desgaste, se requiere que el revenimiento de la mezcla sea menor a 120 mm y utilizar concretos con módulos de rotura (MR) aproximados a los 40 kg/cm<sup>2</sup> (4 MPa).
- Se deben utilizar coronamientos o acabados superficiales compuestos por materiales metálicos o agregados minerales como el cuarzo.
- Para superficies que sufren erosión excesiva por elementos abrasivos, se recomienda: utilizar fibras de macro refuerzo, emplear agregados duros y densos, acabados superficiales que mejoren la dureza y aplicar curado intensivo por 28 días.
- El contenido mínimo de cemento según el tamaño máximo del agregado, se puede observar en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Contenido de cemento mínimo para pisos con desgaste**

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE AGREGADO (mm)	CONTENIDO MÍNIMO DE CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )
38,1	280
25,4	310
19,0	320
12,5	350
9,5	360

Fuente: Sánchez de Guzmán (2002)

#### 4. Especificaciones para deterioros provocados por agentes físicos

##### Fisuras por cambios de humedad

Para estructuras expuestas a ciclos de humedecimiento y secado, el concreto debe tener baja permeabilidad y porosidad, por lo que la normativa generalmente establece relaciones A/C máximas y resistencias a la compresión mínimas. En la tabla 3.7. se muestran valores básicos.

**Tabla 3.7. Relación A/C y f'c para concretos expuestos a cambios de humedad**

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	A/C MÁXIMA	f'c MÍNIMA (MPa)
Concreto sin acero de refuerzo expuesto al agua	0,50	24
Concreto reforzado expuesto al agua de mar	0,40	35

Fuente: Sánchez de Guzmán (2002)

##### Fisuras por cambios de temperatura

Las burbujas que proveen los sistemas de inclusión de aire, constituyen la mejor manera de aliviar las presiones que se generan en la matriz de concreto cuando se produce un aumento de volumen debido a los ciclos de hielo y deshielo. En la tabla 3.8. se muestra el contenido de aire incluido para un concreto resistente a congelamiento y deshielo.

**Tabla 3.8. Contenido de aire para concreto resistente a hielo y deshielo**

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO		CONTENIDO DE AIRE (%)	
Pulgadas	mm	Exposición severa (humedad constante)	Exposición moderada (humedad intermitente)
3/8	9,5	7,5	6
1/2	12,5	7	5,5
3/4	19,1	6	5
1	25,4	6	4,5
1 1/2	38,1	5,5	4,5
2	50,8	5	4
3	76,1	4,5	3,5

**Fuente:** ACI 318-02 sección 4.2.1 (2002)

El ACI 318-02 en la sección 4.2.1 indica que para concretos sometidos a exposición severa se requiera una relación  $A/C \leq 0,45$  y una  $f'_c \geq 31$  MPa.

Según AATH (2001), el Instituto de Hormigón Estructural de España (EHE) propone mezclas de concreto con contenidos mínimos de cemento entre 300 y 325 kg/m<sup>3</sup>, una resistencia a la compresión mínima de 30 MPa, una  $A/C$  máxima de 0,50 y un porcentaje de aire incluido mínimo de 4,5%. Además, menciona que el CIRSOC 201-2001, especifica que los agregados a emplearse en la mezcla tienen que poseer una densidad mínima de 2,50 kg/m<sup>3</sup> y una absorción de agua a las 24 horas menor a 3% en masa y para elementos con espesores menores o iguales a 400 mm, el contenido de cemento debe estar comprendido entre 320 y 370 kg/m<sup>3</sup>.

### **5. Especificaciones para deterioros provocados por agentes biológicos**

- Para evitar la acumulación de polvo y humedad que generan capas biológicas, se debe emplear un concreto denso, de baja permeabilidad y poca porosidad superficial. Por lo tanto, se debe fabricar un concreto con una baja relación  $A/C$ , un adecuado proceso de compactación, curado, acabado superficial y tratamiento de juntas.

- Cuando no se pueda evitar la presencia de humedad en el elemento de concreto, se pueden utilizar agentes biocidas como las sales de amonio, los fenoles y algunos compuestos de mercurio y estaño.



## 6. Especificaciones para deterioros provocados por la reacción álcali – agregado (RAA)

- Establecer la reactividad de los agregados, según la norma ASTM C295.
- Utilizar cementos con bajos contenidos en álcalis (óxidos de sodio y potasio).
- Impermeabilizar las superficies puede atenuar el fenómeno de expansión cuando éste se encuentra en sus primeras manifestaciones.
- Las puzolanas (microsilíce, escoria de alto horno y cenizas volantes) contrarrestan la reacción álcali – sílice.
- Utilizar aditivos a base de litio para mitigar la acción del sodio del cemento (álcalis).

En la tabla 3.9. se presentan porcentajes máximos de minerales reactivos que se pueden tolerar en la composición petrográfica de los agregados, según el CIRSOC 201-2001.

**Tabla 3.9. Porcentaje máximo de minerales reactivos**

MINERAL	PORCENTAJE
Cuarzo tensionado, microfracturado o microcristalino	5%
Calcedonia con trazas de ópalo	3%
Tridimita o cristobalita	1%
Ópalo	0,5%
Vidrio volcánico	3%
Arcillas del tipo esmectitas en la masa de basaltos	2%

Fuente: AATH (2001)

## 7. Especificaciones para evitar la formación de etringita diferida (FED)

Según el estudio de Segerer (2003) expuesto en las memorias del Simposio fib Argentina (2005), se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para controlar la FED en obras masivas de concreto en ambiente tropical:

- Utilizar cementos elaborados con clinkers que contengan menos del 1,0% de sulfatos.

- Omitir el uso de cementos tipo III (alta resistencia inicial), ya que presentan un alto contenido de  $C_3S$  y una elevada finura que generan un alto calor de hidratación.
- Limitar el uso de aditivos con un contenido de azufre mayor al 2% de la masa de cemento.
- Evitar el uso de agregados que puedan estar contaminados con piritas (sulfatos).
- Controlar exhaustivamente la temperatura de la mezcla en el proceso de colado y tomar las medidas necesarias para evitar que el concreto supere los  $65^{\circ}C$  durante su colocación.
- Evitar el curado acelerado con vapor.
- Controlar el contenido de álcalis solubles ( $Na_2SO_4$ ) en el concreto, ya que debe ser inferior al 0,8% de  $Na_2O$  equivalente.

#### **8. Especificaciones para controlar la contracción por secado**

- Evitar terminantemente las adiciones descontroladas de cemento y agua a la mezcla en sitio para “mejorar” la trabajabilidad.
- Diseñar concretos con relaciones A/C menores a 0,50.
- Evitar el uso de agregados que absorben agua, tales como las pizarras y las areniscas.
- Controlar el proceso de curado del concreto, mediante el uso de membranas o curado constante durante 7 días como mínimo después del colado.

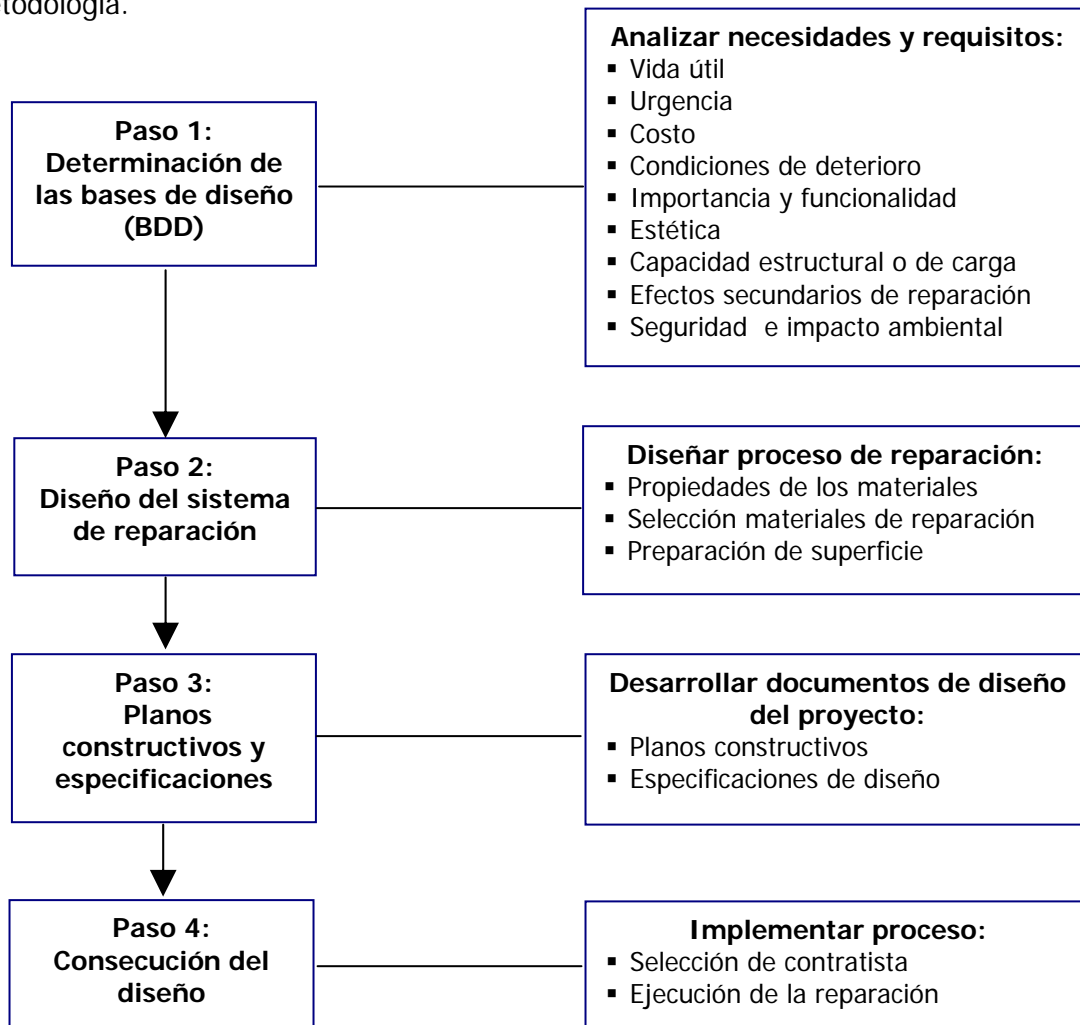
#### **4. SISTEMA DE REPARACIÓN**

Reparación se define como el reemplazo o corrección de los deterioros, daños o fallas en materiales, componentes y elementos de una estructura de concreto. Se utilizan sistemas conformados por técnicas y materiales diseñados especialmente para cumplir con los requerimientos específicos de cada caso.

La metodología de reparación propuesta tiene como base el método de diagnóstico de Tres Niveles, específicamente el Paso 3 de cualquiera de los niveles (Valoración de las condiciones de la estructura).

Esta metodología se adapta de la Guía de reparación de concreto del ACI 546 (2001) junto con las recomendaciones del ICRI (1996-1997) y toma en cuenta las estrategias propuestas por Emmons (1993).

En la figura 3.5. se muestra un diagrama con la metodología de reparación y en las siguientes secciones se explican detalladamente los pasos que componen dicha metodología.



**Figura 3.5. Esquema general de metodología de reparación**

#### ***4.1. Paso 1: Determinación de las bases de diseño (BDD)***

La determinación de las bases de diseño (BDD), tiene como punto de partida la evaluación de las condiciones de la estructura que se realiza en el Método de Tres Niveles, es decir, el estudio de la interacción entre causas y efectos del deterioro. En este paso se determinan las necesidades del usuario y los requisitos con los que debe cumplir la estructura con el fin de definir el alcance de la reparación y para prever la necesidad de emplear dispositivos de protección y refuerzo temporal de los elementos principales de la estructura. Entre las necesidades y los requisitos a considerar se tiene:

1. *Vida útil esperada:* Analizar el periodo de garantía de reparación y la duración esperada del ciclo de mantenimiento.
2. *Urgencia de la reparación:* Determinar la cantidad de tiempo que tarda en implementarse la reparación y la puesta en servicio de la estructura.
3. *Costo de la reparación:* Comparar el costo y las características que definen los productos y métodos de reparación, como: la garantía, el desempeño bajo las condiciones de servicio y el mantenimiento requerido.
4. *Condiciones de la superficie o elemento estructural:* Evaluar el área, el espesor, la posición o localización (horizontal, vertical o inclinado), la accesibilidad, el calibre, espaciado y el recubrimiento del refuerzo del elemento dañado.
5. *Importancia estructural del elemento o miembro:* Determinar si los miembros a reparar son parte de la estructura de soporte principal (sistema sismorresistente).
6. *Funcionalidad del miembro:* Determinar las funciones operativas que cumple el elemento en la estructura, tales como: cerramiento, almacenamiento, superficie de tránsito, soporte de equipos, entre otros.
7. *Estética o apariencia:* Evaluar los requerimientos de textura, color, solidez, porosidad, permeabilidad, hermeticidad y planicidad.
8. *Capacidad estructural o de carga requerida:* Identificar el tipo de solicitación de carga: vivas, muertas, acciones externas, impacto, vibración, abrasión y erosión.

9. Efectos secundarios de la reparación en el comportamiento estructural: Determinar si los cambios en la rigidez, inercia, geometría y en la masa de los elementos de la estructura principal, son significativos.

10. Seguridad e impacto ambiental del proceso de reparación: Considerar el ruido, el polvo, la vibración, la humedad y los escombros generados por el proceso de reparación dentro del medio.

#### **4.2. Paso 2: Diseño del sistema de reparación**

El diseño del sistema de reparación inicia con la evaluación de las propiedades o características de los materiales y los métodos de reparación y preparación de superficie, para que la selección del método brinde un balance óptimo entre desempeño, riesgo y costo y cumpla con las disposiciones definidas en las BDD.

##### **1. Propiedades del material**

Para seleccionar un material se debe partir de la información generada en la definición de las bases de diseño (BDD), para luego analizar las propiedades que caracterizan el desempeño del material. Entre las características a analizar se tienen las siguientes:

a) Esfuerzo de adherencia: en la mayoría de los casos es necesario utilizar materiales que ofrezcan una unión efectiva con el concreto existente. El desempeño de la unión depende de la preparación de la superficie (perfil de adherencia), de las técnicas de aplicación del material y de la compatibilidad entre los coeficientes de expansión térmica de las superficies; generalmente la falla en las uniones se debe a esfuerzos térmicos diferenciales o a la contracción por secado.

b) Comportamiento dimensional: los cambios relativos en las dimensiones entre la superficie de reparación y la base existente afectan la unión, la capacidad de carga, la durabilidad y la apariencia. Los aspectos que influyen directamente en el comportamiento dimensional de un material son:

- Contracción por secado: determinada por las condiciones ambientales (temperatura - humedad) y características del material (permeabilidad, cantidad, humedad superficial). Es necesario que un material de reparación

no experimente contracción en las condiciones de aplicación. Los materiales cementicios pueden controlar la contracción al utilizar bajas relaciones A/C.

- Coeficiente de expansión térmica: en el concreto depende de la naturaleza de los agregados y adiciones. Según el ICRI (1996) el coeficiente del concreto es aproximadamente  $10,9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  y el de los polímeros (methilmethacrylato, epóxicos y uretanos) es hasta 18 veces mayor, o cinco veces mayor si se mezclan con materiales cementicios o agregados; por lo que los cambios de temperatura generan esfuerzos de cortante en las uniones.
- Módulo de elasticidad (E): es recomendable que el material de reparación posea un módulo similar o compatible con los materiales existentes. En aplicaciones no estructurales, se prefiere utilizar materiales con un módulo de elasticidad bajo para que soporte más deformaciones y así reducir el agrietamiento y delaminación potencial.

c) Durabilidad: el material debe ser especificado para que resista las condiciones de servicio y las del medio ambiente. Entre los aspectos básicos a evaluar se tiene: la permeabilidad, la resistencia a los ciclos de hielo – deshielo, a los sulfatos, a los cloruros, a los carbonatos y a la abrasión.

d) Propiedades mecánicas: es necesario que los materiales de reparación tengan la capacidad de transmitir adecuadamente las cargas a los elementos de concreto existentes, además, deben absorber y resistir cambios volumétricos, expansiones, esfuerzos de tensión, flexión, compresión y resistencia al corte.

e) Propiedades eléctricas: existe un incremento en la actividad de corrosión cuando se presentan diferencias de potencial entre los materiales que componen un mismo miembro estructural (corrosión galvánica), por lo que se deben evaluar las características eléctricas del material.

f) Constructibilidad: entre los aspectos que caracterizan la facilidad y eficiencia de aplicación de un método o material de reparación, se tiene:

- La fluidez del material para establecer la capacidad para penetrar y llenar cavidades.

- La capacidad de ganar resistencia en cierto tiempo para determinar la puesta en servicio.
- La magnitud de los cambios de temperatura o liberación de calor durante la hidratación.
- El comportamiento del material en ambientes fríos, calientes y húmedos.
- El tiempo de mezclado, colocación y acabado superficial.
- La compatibilidad con los tratamientos de superficie y los materiales existentes que se encuentran en contacto.

## 2. Selección de materiales de reparación

La selección de los materiales se realiza considerando las propiedades de los materiales anteriormente descritas, necesarias para cumplir con los requisitos y exigencias del proyecto (BDD).

En la tabla 3.10. se presentan las principales propiedades de los materiales básicos de reparación utilizados en estructuras de concreto, especialmente para sustituir miembros deteriorados y superficies, ya que son materiales que desarrollan resistencia estructural.

**Tabla 3.10. Propiedades de algunos materiales básicos para reparación de estructuras de concreto**

MATERIAL	COEF. EXP. TÉRMICA	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)				E (MPa)	PERMEAB. % DE CONCRETO	RESIST. CONGELAMIENTO	LIBERACION DE CALOR
		1h	1d	3d	28d				
Concreto de Cemento Portland	Similar sustrato	0	4.5	17.2	34.5	2,6x10 <sup>4</sup>	90	Buena	Bajo
Mortero de Cemento Portland	Similar sustrato	0	4.5	17.2	34.5	2,3x10 <sup>4</sup>	90	Buena	Bajo
Mortero epóxico	1.5-5 x concreto				82.7	1,5x10 <sup>4</sup>	10	Excelente	Alto
Concreto lanzado (Shotcrete)	Similar sustrato	0	5.5	24.1	34.5	2,6x10 <sup>4</sup>	60	Buena	Bajo
Methylmetacrylato	1.5-5 x concreto	27.6	82.7	82.7	82.7	2,0x10 <sup>4</sup>	10	Excelente	Alto
Concreto modificado con microsílca	Similar sustrato	0	20.7	27.6	51.7	2,8x10 <sup>4</sup>	60	Buena	Bajo
Concreto modificado con latex	Similar sustrato				41.4	1,7x10 <sup>4</sup>	50	Excelente	Bajo
Mortero modificado con polímeros	Similar sustrato		10.3		34.5	1,7x10 <sup>4</sup>	50	Excelente	Moderado

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En la tabla 3.11. se presentan las características, aplicaciones y limitaciones asociadas a los selladores de grietas o de fisuras.

**Tabla 3.11. Propiedades de selladores de grietas**

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN	LIMITACIONES	OTROS
URETANO	Excelente adhesión y flexibilidad. Alta resistencia a la tensión. Baja viscosidad.	Aplicación manual y/o mecánica. Inyección simples o múltiples. Sella grietas finas.	Sensible a la humedad y a la alta temperatura.	
POLISULFUROS	Sistemas de dos componentes de polímero- polisulfuros.	Sella juntas de toda clase sujetas a expansión y contracción extrema. Se puede aplicar en juntas verticales y horizontales. Resiste a temperaturas extremas, sales, ácidos, álcalis y a impactos fuertes.	No debe aplicarse sobre superficies húmedas. En contacto directo con materiales bituminosos se puede presentar un curado insuficiente.	El material forma un sello sólido de caucho, cuya consistencia o dureza final es variable según requerimientos específicos de la obra.
MATERIALES ASFÁLTICOS	Son revestimientos que pueden aplicarse diluidos o en forma de alta viscosidad con rellenos inertes que lo hacen tixotrópico. También son colocados con calor sin solvente.	Se aplican en pisos, techos, fundaciones y paredes donde se requieren como barrera contra el agua. Mezclado con algunos químicos mejoran su resistencia a gases industriales condensados y ataque de la luz solar.	Son degradados fácilmente por la acción de la luz solar Considerados riesgosos para la salud. Altamente sensible a compuestos hidrocarbonados.	En comparación con otros revestimientos, son de bajo costo.
LECHADAS (GROUTS)	Productos previamente dosificados. Excelente penetración. Retracción compensada. Alta resistencia mecánica. Resistencia a fluencia, a alta temperatura y a la compresión.	Para reparaciones rápidas. Anclaje de equipos con vibración.	Espesores de grieta entre 12.7 mm y 50.8 mm. Sensible a la humedad. Puede ser dañino para la salud. Fraguado rápido.	

**Fuente:** Adaptado de Helene (2003)

En las tablas 3.12. y 3.13 se muestran las características y aplicaciones de algunos sistemas de protección superficial.



**Tabla 3.12. Características de sistemas de protección superficial**

TIPO DE PROTECCIÓN /REVESTIMIENTO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
Impermeabilizante	Previene la entrada y salida de agua del concreto. Pueden ser decorativos y/o protectores. Pueden ser hechos de materiales epóxicos, uretanos, acrílicos y cubierta cementosa modificadas con polimeros. Estos sistemas pueden ser diseñados para presión hidrostática positiva o negativa. Generalmente son películas gruesas de asfalto, epóxicos o brea uretánica. Pueden ser rociadas en la superficie del concreto o aplicada como láminas. Los revestimientos aislantes usados sellan la porosidad del concreto y previenen la absorción de agua.
Recubrimientos resistentes a la humedad ambiental	Generalmente son películas delgadas de emulsiones asfálticas, alquitran de hulla o selladores penetrantes. Normalmente no son efectivos contra presiones hidrostáticas. Algunas veces se usan en conjunto con recubrimientos decorativos o protectores. Un uso común de éstos es en proteger al concreto contra el daño por congelamiento-descongelamiento. Dentro de esta clasificación se incluyen los compuestos hidrófugos (repelen el agua pero permiten que el concreto respire).
Protección	Proteger al concreto de la exposición a ciertos químicos, como los ácidos, álcalis y sulfuros. Usualmente previenen la penetración de soluciones salinas y otros químicos corrosivos en el concreto, los cuales causan corrosión del acero de refuerzo.

Fuente: Adaptado de Helene (2003)

**Tabla 3.13. Aplicaciones de los sistemas de protección**

PROTECCIÓN (REVESTIMIENTO/ RECUBRIMIENTO)	RESIST. AL AGUA	LIMPIEZA	ESTÉTICA	RESIST. AL POLVO	QUÍMICOS SEVEROS	DAÑO FÍSICO SEVERO
Silicon/silanos/siloxanos	R	NR	NR	NR	NR	NR
Cementosos	R	NR	R	NR	NR	NR
Película de poliuretano	R	R	R	R	NR	NR
Epóxico - poliéster	R	R	R	R	NR	NR
Latex	R	R	R	R	NR	NR
Caucho clorado	R	R	R	R	NR	NR
Epóxico	R	R	R	R	NR	NR
Epóxico fenólico	R	R	R	R	R	NR
Epóxico con agregados	R	R	R	R	R	NR
Uretanos	R	R	R	R	R	R
Elastoméricos	R	R	R	R	R	R
Alquitran de hulla	R	R	NR	R	R	R
Vinil ester/poliéster	R	R	NR	R	R	R
R: Recomendado NR: No Recomendado						

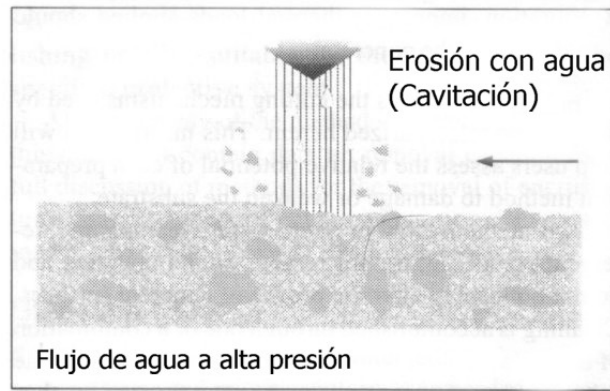
Fuente: Adaptado de Helene (2003)

### 3. Preparación de superficie

Se deben identificar los métodos capaces de producir el perfil de adherencia compatible con los requerimientos de aplicación del material seleccionado, para luego comparar las capacidades y limitaciones, los requerimientos operativos y las consideraciones ambientales de varios métodos.

Para producir los perfiles de adherencia se utilizan mecanismos para remover el concreto, entre los cuales se encuentran los siguientes:

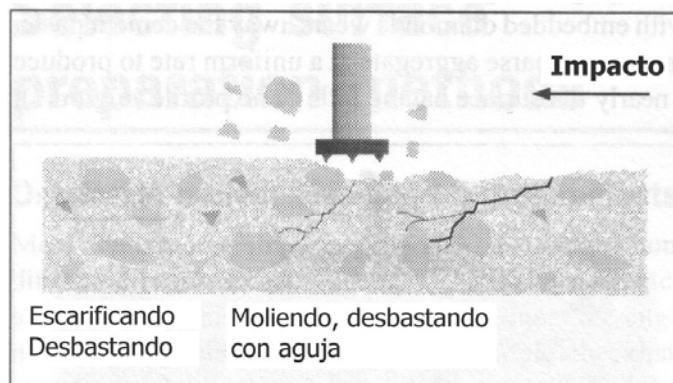
- Erosión: fuerza abrasiva que desintegra progresivamente la superficie de concreto para lograr un perfil empleando piedras, bloques o discos abrasivos con diamantes que remueven la pasta de cemento y los agregados. Además, existe la erosión provocada por un flujo de agua a alta velocidad (cavitación), que remueve la pasta del cemento y los agregados. Métodos: agua aplicada a ultra alta presión y molino. Ver figura 3.6.



**Figura 3.6. Erosión**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

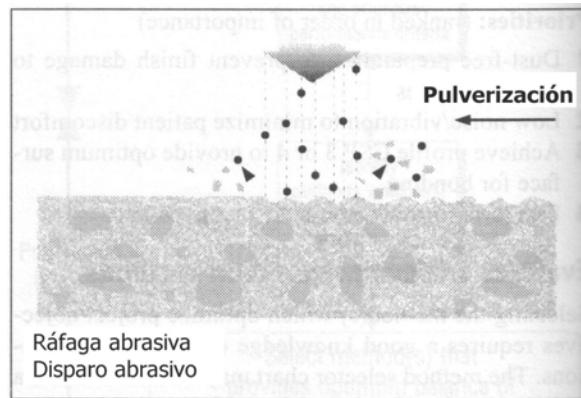
- Impacto: fuerza mecánica que produce cargas instantáneas que exceden la capacidad en tensión y compresión del concreto, superando los esfuerzos de fluencia del material. La fuerza de impacto pulveriza y fractura la matriz de concreto en los puntos adyacentes al contacto con el dispositivo. Métodos: escarificado, escarificado con aguja, escamado y molino. Ver figura 3.7.



**Figura 3.7. Impacto**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

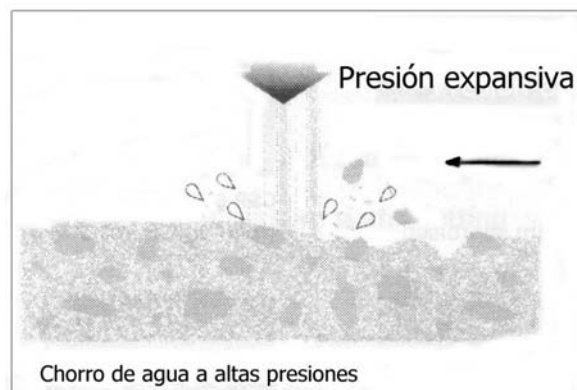
- Pulverización: se remueve los elementos superficiales de la matriz de concreto, mediante la colisión de pequeñas partículas que viajan a alta velocidad. Las partículas no provocan grietas ni orificios en la superficie, ya que poseen una masa comparativa despreciable. El tipo de perfil de adherencia, depende del tiempo de exposición al impacto de las partículas. Métodos: chorro abrasivo de arena y partículas de acero. Ver figura 3.8.



**Figura 3.8. Pulverización**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

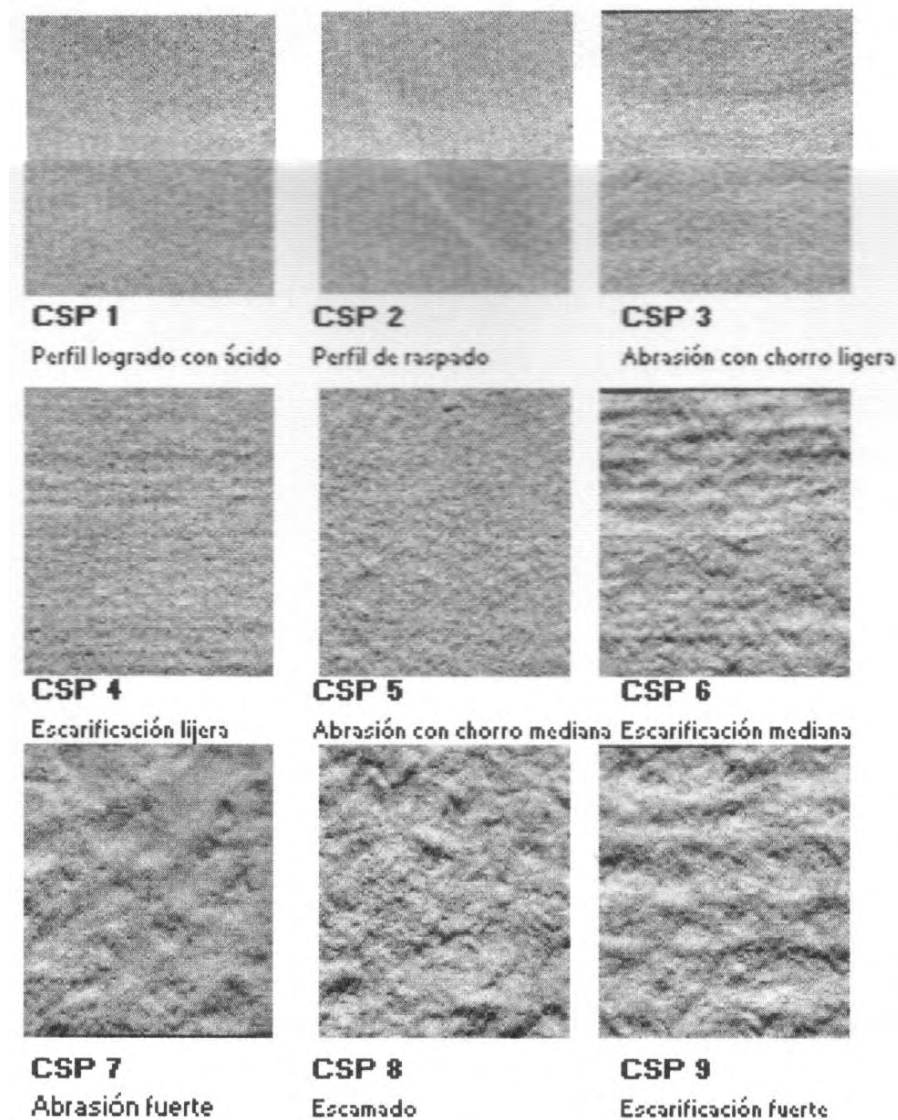
- Presión expansiva: la presión expansiva para modificar la superficie de concreto, se logra mediante vapor o agua. El vapor produce el secado del agua que se encuentra entre los poros del concreto, incrementa la presión en los poros, logrando aumentar los esfuerzos de tensión cerca de la superficie, con lo que se fractura la interfase entre los agregados y la pasta. La temperatura del vapor tiene el límite máximo de 300 °C, ya que temperaturas superiores producen fracturas de carácter estructural en los elementos de concreto. El chorro de agua a altas presiones (100-300MPa), produce un efecto de microfisuración similar a la producida con vapor a alta temperatura. Ver figura 3.9.



**Figura 3.9. Presión expansiva**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

Los perfiles superficiales de adherencia (CSP - Concrete Surface Profiles), caracterizan la rugosidad de la superficie de concreto. El Instituto Internacional de Reparación de Concreto (ICRI), ha definido nueve distintos perfiles producidos por diferentes métodos de remoción de concreto. El CSP1 es el más plano, mientras que CSP9 es el más rugoso. La textura o apariencia del perfil, depende del esfuerzo aplicado por el método de remoción, del tamaño de agregado y del acabado superficial del concreto. En la figura 3.10 se distinguen los diferentes perfiles según el ICRI.



**Figura 3.10. Perfiles de superficies de concreto (CSP)**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

### ***4.3. Paso 3: Planos constructivos y especificaciones***

#### **1. Planos constructivos**

Los planos de un proyecto de reparación deben ser preparados con cierta flexibilidad para considerar la variación en sitio de los procesos como: la remoción del concreto, la preparación de la superficie, la reubicación del refuerzo y la estimación de las cantidades de material. Conforme se ejecute la reparación, se minimizan las variaciones en las cantidades y en procesos estimados, con lo que se pueden realizar correcciones o actualizaciones a los documentos de diseño.

Los planos deben incluir detalles que muestren esquemáticamente los procedimientos o pasos a seguir en: la remoción del concreto, la preparación de superficie, la aplicación de los materiales y la reparación del acero de refuerzo.

En los planos se debe presentar la colocación de estructuras de soporte temporal, cuando se proyecta la remoción parcial o total de elementos soportantes (vigas continuas, columnas y marcos especialmente miembros presforzados). Además, se debe mostrar la ubicación de los sistemas de protección de las áreas adyacentes al sitio de la reparación, con el fin de evitar la propagación del ruido, escombros, polvo y humedad.

#### **2. Especificaciones de diseño**

Las especificaciones de reparación deben ser claras y concisas en cuanto a la condición y alcance del trabajo (BDD), deben incluir un resumen del diagnóstico para que el contratista ejecutor de la reparación se forme criterio de la condición de la estructura y de las necesidades que se tienen que solventar.

Además, se debe especificar rigurosamente los requerimientos de los materiales, las consideraciones de aplicación, las pruebas y ensayos para evaluar el desempeño y calidad.

En las especificaciones se debe disponer el tipo de estructuras de soporte temporal y los elementos de protección necesarios para llevar a cabo la reparación.

### ***4.4. Paso 4: Consecución del diseño***

#### **1. Selección del contratista**

Se recomienda contratar empresas o grupos de trabajo que posean experiencia en reparaciones de estructuras de concreto y se debe verificar los antecedentes. Es

conveniente contar con los servicios de especialistas en cada fase del proceso de reparación, por ejemplo en primer lugar se contratan expertos en remoción de concreto, preparación de superficies y perfiles de adherencia, y luego se contrata un aplicador o colocador de materiales y de recubrimientos autorizado por los fabricantes de los productos.

## **2. Ejecución de la reparación**

La reparación debe ejecutarse, conforme a los planos y a las especificaciones.

Las reparaciones de estructuras de concreto, requieren especial atención en los detalles e implementar el uso de buenas prácticas constructivas. Por ejemplo, se deben usar técnicas adecuadas al colar concreto en elementos esbeltos, ya que existen altas probabilidades que la nueva superficie se agriete por contracción plástica, lo que implicaría una disminución considerable en la vida útil de la reparación.

Se debe considerar que las fallas prematuras en las reparaciones, generalmente están asociadas a una deficiente preparación de superficie, falta de control de las condiciones de aplicación de los materiales y el uso de técnicas constructivas inapropiadas.

Seguidamente se presentan los pasos para ejecutar una reparación en cualquier estructura de concreto. Ver el esquema de cada uno de los pasos en la figura 3.11.

a) Paso 1: Localizar, identificar y definir los límites del área a reparar, haciendo uso de algún método de inspección de estructuras. Si es necesario se deben instalar sistemas temporales de soporte.

b) Paso 2: Remover el concreto deteriorado utilizando los métodos recomendados en la sección de mecanismos para remover el concreto.

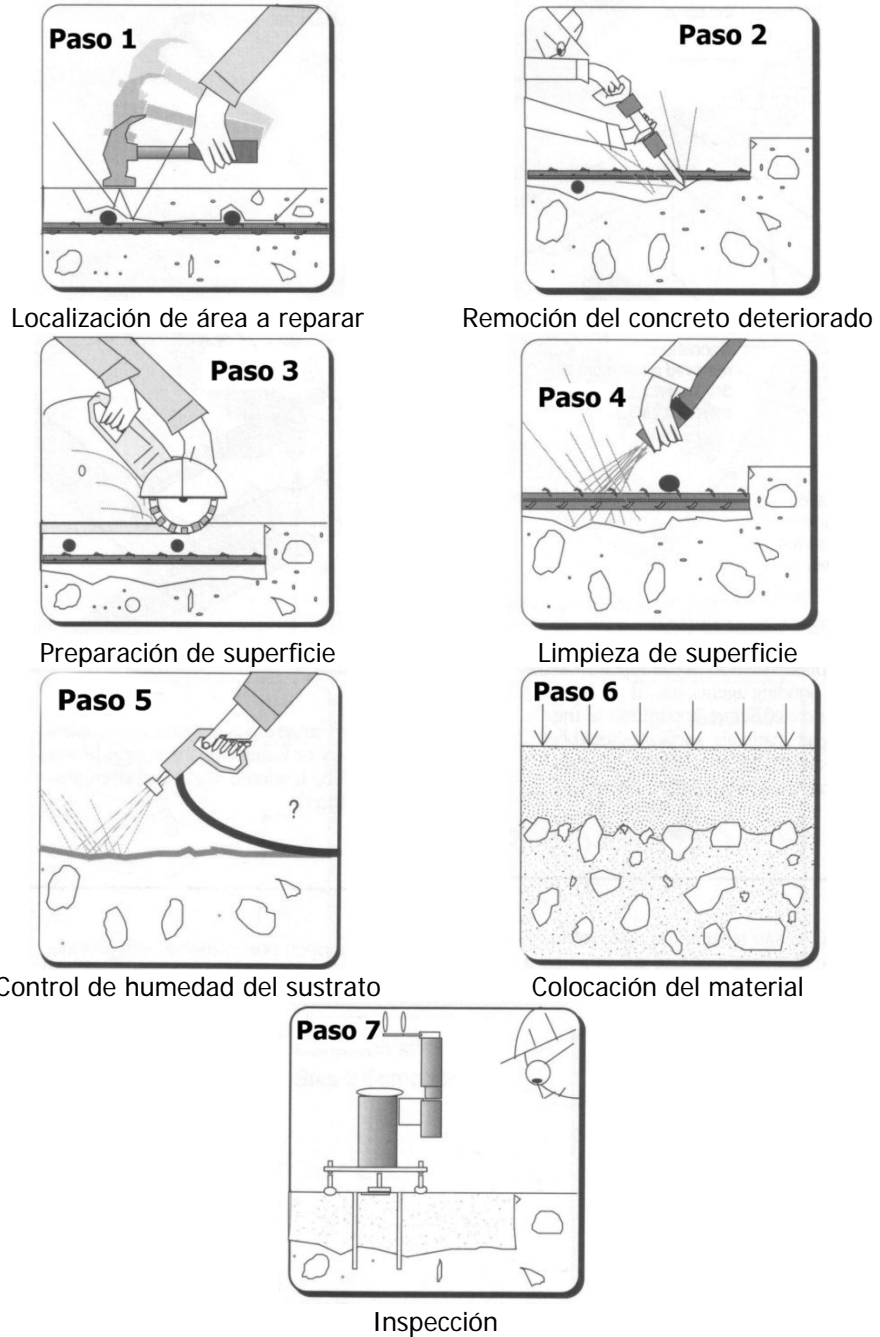
c) Paso 3: Preparar la superficie de los límites del área a reparar.

d) Paso 4: Limpiar la superficie de adherencia, el acero expuesto, los límites y las juntas. Verificar que los poros del concreto se encuentren libres y abiertos para recibir el material de reparación.

e) Paso 5: Controlar la humedad del sustrato o base, para asegurar las condiciones adecuadas de unión. Si el sustrato absorbe agua del material de reparación provoca contracción excesiva, mientras que si la humedad del sustrato es alta se afecta la adherencia.

f) Paso 6: Instalar el material de reparación con las técnicas de vibrado, la presión y la velocidad recomendadas por el fabricante.

g) Paso 7: Inspección del cumplimiento de especificaciones y requerimientos del diseño de la reparación.



**Figura 3.11. Procedimiento general de reparación**

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

## **5. CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO DE REPARACIÓN**

### ***5.1. Control del concreto en estado fresco***

Para comprobar las especificaciones técnicas de la mezcla de concreto fresco utilizada en la reparación, se debe ejecutar el siguiente procedimiento:

- Revisar la hoja de fabricación del concreto.
- Medir el revenimiento del concreto sin aditivos.
- Determinar que la temperatura antes de la colocación no supere los 35°C.
- Inspección visual de los agregados, determinar el tamaño máximo y distinguir los diferentes tamaños consecutivos, con el fin de verificar una granulometría continua.
- Después de incorporar a la mezcla los aditivos especificados, se debe medir de nuevo el revenimiento, para determinar si la mezcla tiene la trabajabilidad requerida para la colocación.
- Determinar que el contenido de aire de la mezcla esté de acuerdo con las especificaciones.
- Elaborar al menos seis cilindros y seis vigas de falla, por cada 10 m<sup>3</sup> de concreto, para determinar la resistencia a compresión y flexión a diferentes edades (7, 14 y 28 días).

Según el estudio de Fernández et al. (2005), descrito en las memorias del Seminario de fib en Argentina (2005), para controlar la calidad de un concreto diseñado por durabilidad, se debe emplear una metodología que profundice la información que proporciona la prueba de revenimiento (cono de Abrams). Esta metodología consiste en implementar ensayos que caractericen el proceso de bombeo del concreto, para lo cual se ha diseñado un equipo de forma cilíndrica que sustituye al cono de Abrams. La adecuada instrumentación del equipo permite obtener datos precisos de velocidad de flujo, caudal y presión del concreto bombeado; los cuales se relacionan con las características de consistencia de la mezcla, tales como: la dosis de aditivos acelerantes y fluidificantes, la relación A/C y la continuidad de la granulometría de los agregados.

### ***5.2. Control de la colocación y compactación del concreto***

Los procesos de curado y compactación del concreto durante la reparación, inciden directamente en las características de permeabilidad, porosidad, uniformidad y relación de



vacíos de la masa. De estas características, depende la resistencia del elemento estructural, para soportar tanto los requerimientos de carga como los de durabilidad.

Por lo tanto, se deben asegurar las siguientes condiciones de colocación del concreto:

- El vaciado de concreto debe efectuarse de tal manera que se alcancen las resistencias deseadas en tiempos determinados, según las condiciones ambientales y de la tecnología disponible. Esto con el objetivo de evitar la formación de fisuras tempranas.

- Procurar que el concreto con menos de 24 horas de colocación, no sufra un choque térmico, o sea un cambio de temperatura mayor a los 20°C. En casos donde no se puedan evitar los choques térmicos, se debe emplear algún sistema de protección que evite los gradientes de temperatura que producen fisuras en las superficies por movimiento diferencial y la formación de etringita diferida (FED).

- Evitar los cambios de humedad en el proceso de curado, para disminuir las posibilidades de generación de fisuras en los elementos estructurales. Por lo que se recomienda el uso de membranas curadoras o sistemas de curado continuo durante los primeros siete días de colado.

- Evitar que la superficie del encofrado se encuentre a una temperatura mayor que la temperatura de la mezcla en el momento del vaciado, para evitar la evaporación acelerada del agua de exudación.

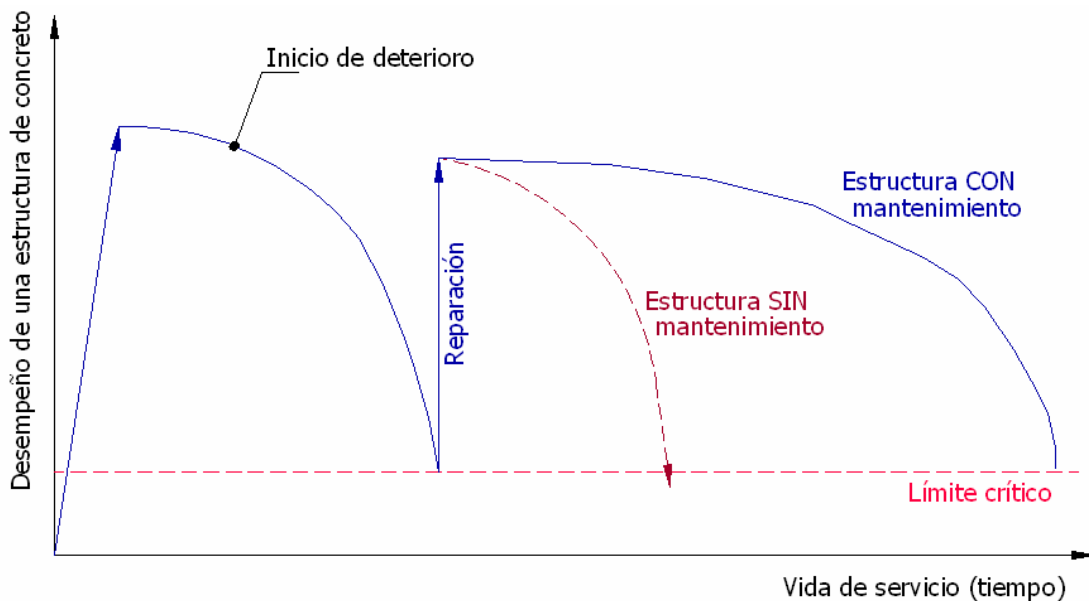
- Evitar que se produzcan daños en los elementos estructurales por el retiro prematuro del encofrado, por lo que se debe dar seguimiento a la ganancia de resistencia del concreto.

### ***5.3. Control de calidad por medio de pruebas y ensayos***

Implementar un programa de ejecución de pruebas y ensayos para controlar la calidad de la adherencia entre la superficie existente y la nueva, además controlar la resistencia del material. Por lo tanto, es necesario obtener núcleos o muestras, para determinar la resistencia a la compresión, la adherencia, los compuestos químicos, la cantidad de cloruros y realizar análisis petrográficos. Ver el apartado 2.2. que describe los ensayos destructivos del Método de Tres Niveles, Paso 2, tabla 3.1.

## 6. MANTENIMIENTO Y PROTECCIÓN

Para la adecuada operación de una obra civil y asegurar condiciones óptimas de desempeño durante la vida útil de diseño, se debe implementar un plan de mantenimiento. En la figura 3.12. se muestra el comportamiento que experimenta una estructura de concreto después de un proceso de reparación. Cuando la estructura no recibe mantenimiento sufre un deterioro en las condiciones de desempeño que puede llegar a sobrepasar el límite crítico funcional aceptable. Mientras que si la estructura recibe un mantenimiento constante, en donde se emplean estrategias de protección, se alcanza un nivel adecuado de desempeño durante más tiempo.



**Figura 3.12. Desempeño de estructuras de concreto con y sin mantenimiento**

**Fuente:** Adaptado de Emmons (1993)

El mantenimiento incluye trabajos de reparación y prevención que se ejecutan, con el fin de impedir la aparición de deterioros o erradicar las patologías incipientes. Las acciones de mantenimiento incluyen tanto tareas simples como la limpieza de drenajes y superficies, como tareas más complejas como lo son la impermeabilización y la protección de los elementos de concreto y acero. A continuación, se describen las estrategias de protección contra los deterioros provocadas por agentes externos asociados con medio ambiente que interactúa a la estructura, no se incluyen los deterioros provocados por

eventos accidentales, ni por agentes internos que forman parte de la composición del concreto.

### 6.1. Protección contra agentes químicos

#### 1. Ácidos

El agresivo ataque químico causado por los ácidos en estado líquido o gaseoso sobre las superficies de concreto puede ser controlado mediante dos maneras: la primera es incorporando materiales químicamente resistentes en la mezcla del concreto y la segunda, que es empleada comúnmente, es la de colocar barreras, recubrimientos o membranas de protección sobre las superficies para evitar el contacto directo entre las sustancias y el concreto. En la tabla 3.14. se muestra algunos sistemas típicos de protección y su comportamiento ante diferentes ácidos.

**Tabla 3.14. Características de sistemas de protección superficial contra los ácidos**

TIPO DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL	TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVICIO (°C)	ACIDOS INORGANICOS	ACIDOS ORGANICOS		
			DEBIL	MODERADO	FUERTE
Epóxicos	66		●	●	
Epóxico-Novolac	80	●			
Methacrylatos	-		●		
Poliéster	107		●	●	
Silicato de potasio	1093	*	●	●	●
Uretanos	66-122	●	●	●	
Vinil	104-127	●	●	●	
PVC	-	●	●	●	●
Ladrillos	Alta	*	●	●	●
Ladrillos c/carbón	-	●	●	●	●

\* No aplica para ácido fluorhídrico (HF)

Fuente: Emmons (1993)

#### 2. Corrosión del acero de refuerzo

Después de tratar o sustituir las barras de acero de refuerzo y de reparar el área de concreto deteriorada por la corrosión, se aplican pinturas, recubrimientos, membranas y selladores superficiales. Dichas sustancias penetran en los poros minimizando el flujo de humedad y vapor ambiental, evitando la difusión de sustancias que provocan la despasivación del concreto de recubrimiento.

Existen dos métodos para realizar la protección catódica, el de corriente impresa y el de ánodos de sacrificio. La corriente impresa emplea una fuente externa de corriente continua (3–20 mA/m<sup>2</sup>) distribuida uniformemente por toda la estructura, la cual mantiene polarizada negativamente la armadura para que no se produzcan las reacciones de oxidación en su superficie. Los ánodos de sacrificio son elementos constituidos por metales con menor potencial de reducción que el acero, como es el caso del zinc y del aluminio, los cuales se conectan a las barras de refuerzo formando pilas de corrosión, donde la oxidación se produce mayormente en el metal de sacrificio logrando proteger el refuerzo. Ver figuras 2.7. y 2.8. en el apartado de corrosión del capítulo 2.

### **3. Ataque de sulfatos**

Aplica los mismos sistemas de protección presentados en el apartado correspondiente a los ácidos.

### **4. Carbonatación**

En elementos de concreto en servicio, se recomienda colocar barreras impermeables que impidan el ingreso de la humedad, luego de realizar la reparación del concreto y el acero afectados por el frente de carbonatación.

Cuando se tienen grietas provocadas por la carbonatación, se aplican membranas elastoméricas que sellan las aberturas y previenen que la corrosión del acero de refuerzo avance.

Se aplican técnicas para transportar los álcalis dentro del concreto carbonatado (re-alcalinización), en donde se coloca una pasta de cemento altamente alcalina que tiene en su interior una malla de titanio que se conecta eléctricamente con el acero de refuerzo. El acero se convierte en un cátodo y los iones agresivos migran desde el acero hasta el elemento de mortero con la malla, con lo que se generan iones <sup>-</sup>OH que restablecen la alcalinidad del medio. Una vez conseguida la re-alcalinización del elemento, se retira la malla y se coloca una protección superficial que prevenga la carbonatación futura.

## ***6.2. Protección contra agentes mecánicos***

### **1. Abrasión**

Para proteger las superficies de concreto contra la abrasión y la erosión se deben colocar coronamientos ("toppings") de alta densidad como los endurecedores de materiales metálicos y los hechos a base de minerales de alta dureza como el cuarzo.

En estructuras en servicio, antes de aplicar cualquier tipo de coronamiento, se debe limpiar la superficie y producir un perfil de adherencia adecuado. El tema de perfiles de adherencia se explicó en el apartado 3 de la sección 4.2. correspondiente a preparación de superficie.

## ***6.3. Protección contra agentes físicos***

### **1. Cambios de humedad**

Después de analizar en las etapas de diagnóstico y reparación las características de los flujos de agua y de la humedad presentes en una estructura, se procede a considerar al menos dos métodos de protección contra el flujo de humedad, para evaluar comparativamente el costo, la vida de servicio, la estética y la constructibilidad de los métodos. Entre las técnicas utilizadas como barreras contra la humedad se tienen: la inyección de lechadas impermeabilizantes en las zonas agrietadas, los selladores elastoméricos de juntas, pinturas o revestimientos hidrófugos, membranas impermeables y el redireccionamiento o control del flujo de agua en la estructura.

### **2. Cambios de temperatura**

Luego de haber colocado un material de reparación resistente a los choques térmicos en una estructura existente que ha sufrido deterioro por ciclos de hielo y deshielo, se debe tratar de evitar al máximo la entrada de humedad dentro del concreto endurecido mediante una estrategia de protección que incluye los siguientes pasos:

- Conducir los flujos, la humedad y el vapor de agua fuera de las zonas en contacto con el concreto que sufre choques térmicos, mediante la construcción de drenajes controlados y sistemas mecánicos como evaporadores.

- Colocar barreras, revestimientos, membranas impermeables de alta densidad que impida la entrada de humedad en los capilares del concreto.

#### ***6.4. Protección contra agentes biológicos***

Para que se desarrolle la vida de microorganismos biológicos en cualquier ambiente se necesita la presencia de agua, por lo que básicamente se utilizan los mismos sistemas de protección presentados en la sección correspondiente a agentes físicos. Además, se pueden emplear selladores penetrantes que cumplen la función de biocidas a base de silano y siloxano.

# **CAPITULO 4**

## **PREVENCIÓN DE PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS NUEVAS**

### **1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta el procedimiento para la prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en obras nuevas. En primer lugar, se exponen los conceptos de diseño preventivo por durabilidad, luego se muestra la metodología para procurar el control de calidad durante la edificación de la obra y los procedimientos para el mantenimiento y protección de los elementos recién construidos.

### **2. DISEÑO PREVENTIVO POR DURABILIDAD**

#### ***2.1. Vida útil de servicio de una estructura nueva***

La vida útil del proyecto debe ser prevista por el diseñador de la estructura y se define como aquel periodo de tiempo necesario para que cualquier mecanismo de deterioro inicie la propagación del daño sin que se llegue al punto que produzca el colapso. En la figura 3.4. del capítulo 3 se muestra el Modelo de vida útil propuesto en por Tuutti, en donde se observa que la vida útil de servicio proyectada de una estructura es la primera recta de la gráfica, antes de entrar en la etapa de vida residual. La vida útil de una estructura se determina con la funcionalidad, la importancia civil y la magnitud de la obra, por ejemplo los puentes y las represas hidroeléctricas se diseñan para una vida útil entre 50 y 100 años.

El diseñador de un proyecto debe tener en cuenta la vida útil efectiva o la garantía que brindan los fabricantes y aplicadores de los recubrimientos y sistemas de protección, además estimar las propiedades de los materiales que componen la mezcla de concreto utilizados en la obra nueva. Por otro lado, para asegurar el cumplimiento del periodo de vida útil de servicio, la inspección de obra debe encargarse de asegurar el cumplimiento de las especificaciones y las buenas practicas constructivas mediante la aplicación de los conceptos del control de calidad.

## 2.2. Especificaciones de diseño por durabilidad

En el apartado 3.2. del capítulo 3 se describe el proceso evolutivo de los códigos y la normativa sobre diseño por durabilidad y en la tabla 4.1 se muestran algunos ejemplos de modelos especializados en el diseño de estructuras nuevas.

**Tabla 4.1. Algunos ejemplos de modelos de diseño por durabilidad especializados en el estudio de estructuras nuevas**

MODELO	AUTORES
* Código modelo para diseño por vida de servicio de estructuras de concreto (Model Code for service life design of concrete structures SLD Model Code)	fib Task Group 5.6
* Guía de diseño de vida de servicio (Service life design guide)	fib Task Group 5.7
365.1R-00: Predicción de vida de servicio (Service Life Prediction): emplea metodologías para definir propiedades físicas y relaciones entre costo y vida útil proyectada	ACI Committee 365
* Estudio numérico del secado y retracción del hormigón utilizando relaciones empíricas entre humedad y deformación	Sonzogni y Sánchez. Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería – UTN Santa Fe
* Modelo viscoplástico para la predicción de la fluencia básica de estructuras de hormigón	Lorefice, Patrón y Urtubey. Universidad Nacional Santiago del Estero – Argentina
* Modelo empírico experimental que proyecta el periodo de iniciación de la corrosión en una estructura de concreto en ambiente marino	Torres y Martínez. Instituto Mexicano de Transporte – México
* Simulación computacional del proceso de fisuración del hormigón debido a la corrosión de las armaduras	Ortega, Orbanich y Fontao. Universidad Nacional del Sur – Argentina
* Modelo constitutivo de flexión y deformación de miembros de concreto reforzado en función del tiempo	Vilnius Gediminas Technical University - Lithuania

\* Fuente: fib (2005)

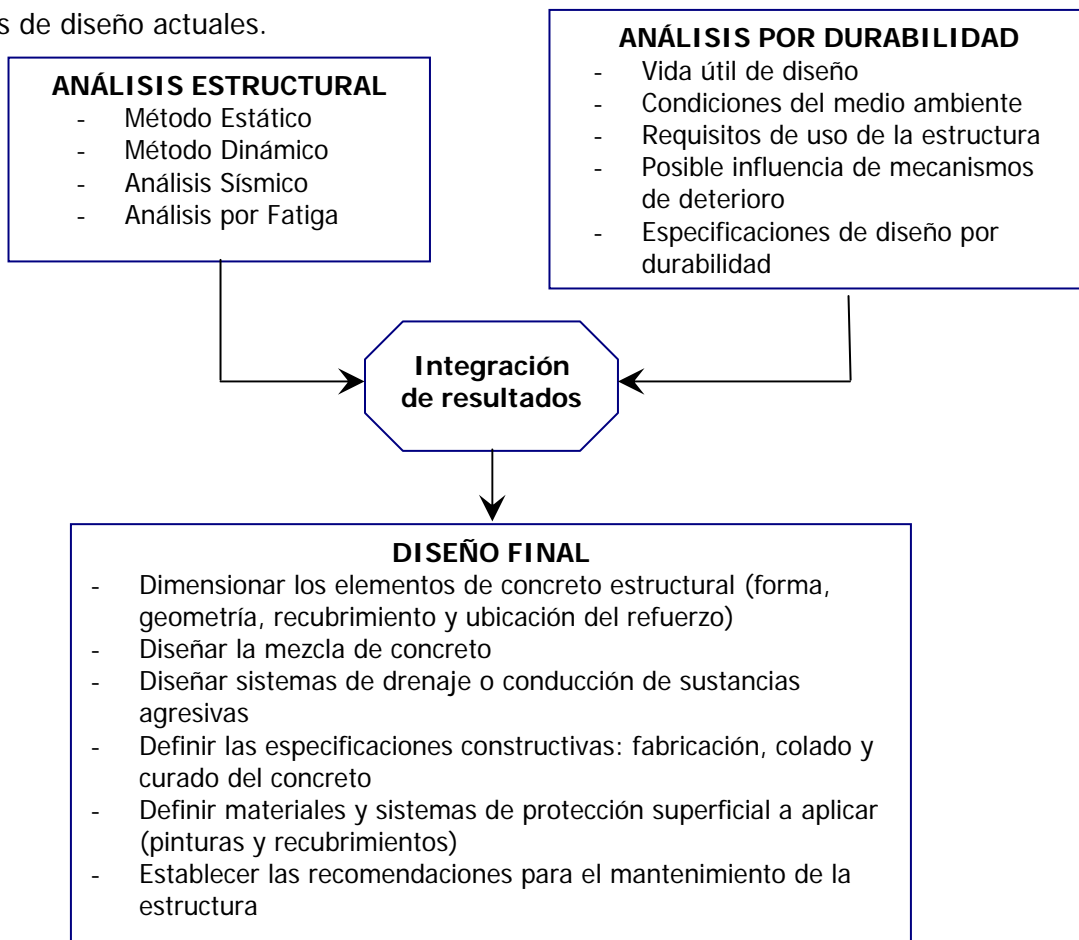
A continuación se presentan los conceptos de diseño de estructuras nuevas, relacionados con la durabilidad de una estructura, contenidos en el Eurocódigo 2 y en el CIRSOC 201-2001, presentados en la publicación de la AATH (2001):

- Una estructura se debe proyectar y construir de forma que se mantenga en condiciones aceptables durante el periodo de vida útil proyectado, sin incurrir en altos costos de conservación.



- Las disposiciones de diseño de la estructura (formas geométricas y especificaciones de métodos y materiales constructivos) deben complementarse con la inspección de los componentes, fabricación, colocación y curado del concreto.
- Para asegurar la durabilidad de la estructura, se deben tomar en cuenta como mínimo los siguientes factores: el uso de la estructura, los requisitos de comportamiento o desempeño estructural y por durabilidad, las condiciones ambientales del medio, las propiedades de los materiales, las características de los métodos constructivos, la forma de los elementos estructurales y la calidad de la ejecución de la obra.

En la figura 4.1. se muestra la interacción que debe existir entre el análisis estructural y el análisis por durabilidad para cumplir con los requisitos fundamentales de los códigos de diseño actuales.



**Figura 4.1. Interacción entre análisis estructural y análisis por durabilidad**

Las especificaciones de diseño por durabilidad para mezclas de concreto que se exponen a diferentes ambientes agresivos se presentan ampliamente en el apartado 3.2. del capítulo 3.

### **3. CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO CONSTRUCTIVO**

El control de calidad del proceso constructivo de una estructura nueva es análogo al expuesto en el apartado 5 del capítulo 3 que trata el control del concreto fresco, la colocación y compactación y las pruebas o ensayos que se deben implementar en reparaciones de concreto.

### **4. PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS NUEVAS**

La protección de estructuras nuevas es necesaria para disminuir los efectos provocados por las acciones inevitables del medio ambiente que rodea a la estructura y así asegurar el cumplimiento de las condiciones definidas en el diseño para la vida útil de servicio. A continuación, se describen sistemas básicos de protección contra deterioros causados por agentes externos, excluyendo los deterioros provocados por eventos accidentales y por agentes internos que forman parte del concreto.

#### ***4.1. Protección contra agentes químicos***

##### **1. Ácidos**

El único sistema de protección preventivo recomendado para un concreto nuevo que estará en contacto con sustancias ácidas y agresivas, es la aplicación de una barrera o recubrimiento superficial que impida el contacto directo entre las sustancias y el concreto. En la tabla 3.14. de la sección 6.1. (capítulo 3) se muestran aplicaciones y características de algunos tipos de sistemas de protección.

##### **2. Corrosión del acero de refuerzo**

Después de diseñar las estructuras siguiendo las especificaciones para evitar la corrosión, empleando concreto de baja permeabilidad y alta densidad, se diseñan sistemas de protección contra la acción de la corrosión en la estructura nueva, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Rodear el acero de refuerzo con una capa de concreto de baja permeabilidad y alta densidad, para lo cual se utilizan concretos con una baja relación A/C modificados con microsilíce y látex.

- Aplicar selladores, revestimientos, pinturas o membranas que penetren dentro de los capilares del recubrimiento, impidiendo la difusión de cloruros y otras sustancias corrosivas. Entre los selladores se tienen las hechas a base de xilano y xiloxano, y entre las membranas y pinturas se encuentran las epóxicas, los uretanos y los methacrylatos.

- Aplicar directamente al concreto y en las barras de acero antes del colado, productos a base de nitritos que funcionan como inhibidores de corrosión. Este método puede provocar efectos secundarios generados por la interacción entre la capa protectora de las barras y el concreto, tales como disminución de la adherencia y reacciones expansivas; por lo que es necesario recomendar productos cuyo comportamiento haya sido exhaustivamente caracterizado en laboratorio.

- Utilizar aceros especiales como el acero inoxidable como refuerzo. Estos materiales no han sido empleados en nuestro medio por su alto costo.

### **3. Ataque de sulfatos**

Aplica los mismos sistemas de protección presentados en el apartado correspondiente a los ácidos.

### **4. Carbonatación**

Además de seguir las especificaciones para producir un concreto con una baja relación A/C, se recomienda incrementar el recubrimiento y aplicar sistemas de protección superficial que impida la penetración del vapor y la humedad, tales como pinturas y recubrimientos con una baja capacidad de transmisión del vapor o membranas formadas por materiales impermeables.

#### ***4.2. Protección contra agentes mecánicos***

##### **1. Abrasión**

En la sección 6.2. del capítulo 3 correspondiente a agentes mecánicos se presentan algunas técnicas de protección de superficies contra la abrasión.

### ***4.3. Protección contra agentes físicos***

#### **1. Cambios de humedad**

Las técnicas utilizadas como barreras contra la humedad en estructuras nuevas son: los selladores elastoméricos de poliuretano en juntas, pinturas, revestimientos hidrófugos o membranas impermeables a base de siloxano, silano o silicona y diseñar sistemas de conducción y drenaje controlado del agua y vapor en la estructura.

#### **2. Cambios de temperatura**

En estructuras nuevas que estarán expuestas a sufrir ciclos de hielo y deshielo se recomienda tomar las medidas necesarias para evitar al máximo el contacto entre los poros o capilares del concreto y cualquier líquido, en especial el agua. En la sección 6.3. del capítulo 3 se presentan las estrategias para evitar la entrada de humedad al concreto.

### ***4.4. Protección contra agentes biológicos***

En la sección 6.4. del capítulo 3 correspondiente a los agentes biológicos se presentan algunas recomendaciones para la protección de superficies.

## CAPITULO 5

### CASO DE ESTUDIO: LOSA DE PISO DE CAMARAS DE CONGELACIÓN INDUSTRIAL

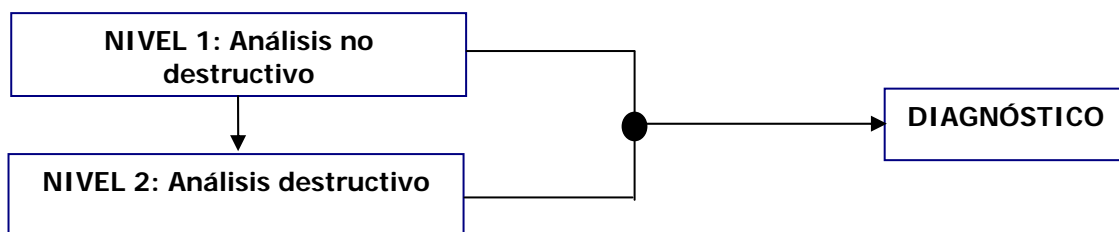
#### 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudia el caso de una losa de concreto reforzado que forma parte del piso de unas cámaras de congelación industrial, en donde se almacenan productos alimenticios. Por tratarse de una estructura en servicio, la determinación y tratamiento de las patologías se realizará mediante el procedimiento expuesto en el capítulo 3.

Siguiendo el Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías, se presenta la información general que describe de la obra, luego se detalla la inspección, las pruebas y la valoración de las condiciones de la estructura. Basado en el diagnóstico y el análisis de las condiciones de la losa, se exponen las especificaciones de diseño correctivo por durabilidad. Tomando en cuenta el diseño por durabilidad se establece el sistema de reparación o reconstrucción para el caso específico y se ejecuta el proceso de control de calidad del proceso constructivo. Por último, se presentan sugerencias para el mantenimiento y protección de la estructura.

#### 2. DIAGNÓSTICO (MÉTODO DE TRES NIVELES)

El Método de Tres Niveles expuesto en el capítulo 3 se adapta para realizar el diagnóstico de patologías en el caso de estudio. El Nivel 3 correspondiente a los análisis de laboratorio y matemáticos especializados no se desarrolla por las limitaciones explicadas en el capítulo 1. En la figura 5.1. se presenta el esquema del método adaptado al caso de estudio.



*Figura 5.1. Método de Tres Niveles para el diagnóstico de patologías adaptado al caso de estudio de la losa de cámaras de congelación*

## ***2.1. Nivel 1: Análisis no destructivo***

En la figura 3.2. del capítulo 3 se muestra un esquema con los pasos que constituyen el Nivel 1 de diagnóstico. A continuación se desarrolla la metodología del Nivel 1 para el caso de estudio:

### **1. Paso 1: Recopilación de información**

La información que se recopila en este paso fue suministrada por el Departamento de Mantenimiento de la industria.

#### ***Información general***

- Nombre de la obra: Cámaras de congelación industrial.
- Localización de la estructura: El Guarco de Cartago.
- Sistema estructural y de cimientos: Losa de concreto reforzado sobre sistema de ventilación de bloques de concreto, aislamiento de poliuretano y barrera de vapor de plástico.
- Fecha de diseño, construcción y puesta en servicio: año 2000.
- Los nombres del propietario, diseñador, inspector y constructor de la obra, se omiten por confidencialidad en este documento.

#### ***Características del medio ambiente***

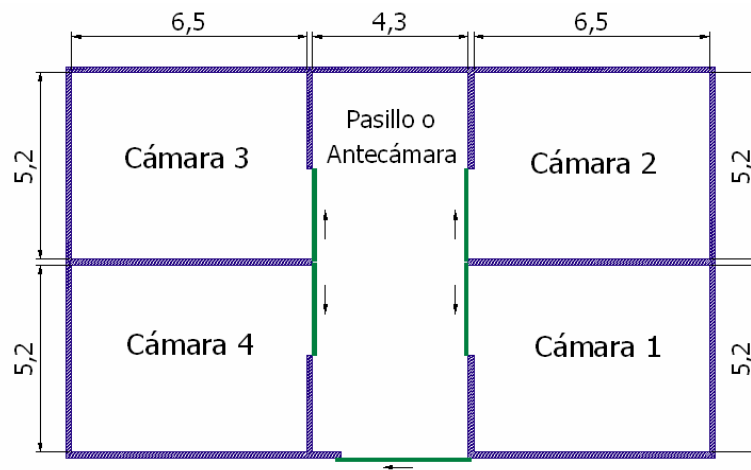
El medio ambiente que rodea a la obra es el microclima que se presenta dentro de las cámaras de congelación, ya que el medio externo no interactúa con la estructura de la losa de piso analizada.

- La humedad relativa dentro de las cámaras se considera alta (cerca a 100%), ya que se presenta condensación de agua en las paredes y cielo raso de la antecámara o pasillo que comunican las cámaras.
- La temperatura mínima de operación es de - 40 °C.
- La temperatura máxima que experimenta las cámaras cuando se descongelan es de aproximadamente unos + 15 °C. Según el Departamento de Mantenimiento en temporada normal de producción las cámaras se descongelan una vez al mes y en temporada alta se descongelan a cada dos o tres meses.

- La losa de piso de concreto perteneciente a las cámaras no se encuentra en contacto con ningún tipo de ácido orgánico o inorgánico, ya que los productos que se almacenan dentro de las cámaras se encuentran en recipientes herméticamente sellados. Con lo que la losa experimenta contacto directo es con el agua producto de la condensación interior, además con el agua y algunos productos de carácter básico utilizados para la limpieza. La limpieza se realiza durante los procesos de descongelación de las cámaras.

Información del diseño original del proyecto

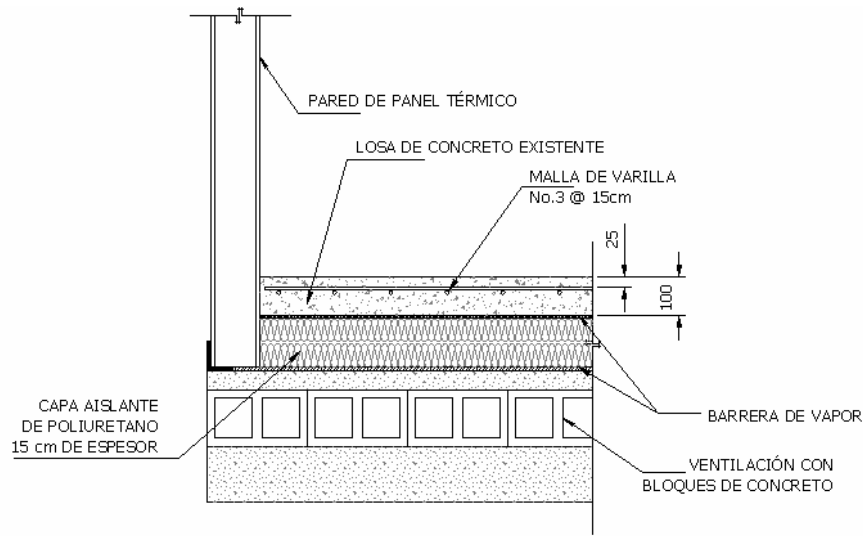
Las cámaras de congelación son cuatro de unos 34 m<sup>2</sup> cada una, con un pasillo o antecámara de unos 44 m<sup>2</sup>, para un área total de 180 m<sup>2</sup>. En la figura 5.2. se muestra un esquema de las cámaras de congelación.



CÁMARAS DE CONGELACIÓN Sin escala/Cotas en m

**Figura 5.2. Esquema de las cámaras de congelación**

El Departamento de Mantenimiento de la obra, no tiene en su poder los planos ni las especificaciones de diseño, la única información del diseño original con la que cuenta es que la losa tiene un espesor de unos 10 cm, refuerzo de malla No. 3 @ 15 cm y la resistencia a la compresión simple del concreto ( $f'_c$ ) es de 300 kg/cm<sup>2</sup>. Además, la losa se encuentra sobre una barrera de vapor de plástico, una capa aislante de polietileno de 15 cm que se encuentra sobre los bloques de concreto acostados que sirven como sistema de ventilación. En la figura 5.3. se muestra un esquema de la losa basado en la información suministrada por el Departamento de Mantenimiento.



DETALLE DE LOSA EXISTENTE \_\_\_ SIN ESCALA / COTAS EN mm

### ***Figura 5.3. Esquema de la losa existente***

#### *Información de los materiales y proceso constructivo utilizados*

No se tiene acceso a ningún documento con información del proceso constructivo, tales como: cuaderno de bitácora de obra, reportes, observaciones del inspector y planos de taller o constructivos.

#### *Historial de servicio*

- Según los encargados de mantenimiento de la obra, hace dos años se comenzaron a observar los siguientes fenómenos: desintegración de la curva séptica de concreto, descascaramientos, fragmentos y partículas sueltas de concreto en los accesos de las cámaras. Estas circunstancias dificultan el tránsito de los montacargas, la limpieza del piso en detrimento de las condiciones higiénicas de la planta. Las manifestaciones de la patología se hacen más evidentes cuando las cámaras se descongelan.

- Los montacargas que circulan sobre la losa poseen llantas de hule y transportan tarimas de madera con cilindros de productos alimenticios herméticamente sellados. La carga aproximada por montacargas tomando en cuenta el peso propio es de aproximadamente 2 toneladas, lo que significa una carga por unidad de área en el piso de 5 kg/cm<sup>2</sup>.



- Según el Departamento de Mantenimiento el proceso de descongelación tarda unas 6 horas, o sea el cambio de temperatura es aproximadamente de 9 °C/h.
- No se ha ejecutado ningún estudio previo de durabilidad o patología.

## **2. Paso 2: Inspección de la estructura**

### Definición de recursos

La inspección debe realizarse cuando las cámaras se encuentran en operación, por lo que se tienen que respetar las normas de seguridad e higiene demandadas por el Departamento de Mantenimiento.

Los recursos que se utilizan para la inspección son: cámara fotográfica, cinta métrica, comparador de fisuras y piqueta.

### Inspección

- Visión general: las losas de las cuatro cámaras presentan un deterioro similar, concentrándose en la zona de ingreso de los montacargas, alrededor de las paredes y cerca de las juntas. Se observa que la superficie del piso se encuentra congelada.
- El deterioro observado en la zona de ingreso de los montacargas, se describe como delaminación o escamación superficial, disminución de la cantidad de pasta de cemento y exposición de los agregados. El material suelto, se puede retirar fácilmente a mano, sin utilizar ninguna herramienta, especialmente en las cámaras que se encuentran descongeladas. Ver fotografía 5.1. y 5.2.



***Fotografía 5.1. Zona de ingreso de montacargas (04/07/05)***



***Fotografía 5.2. Concreto de la losa se destruye manualmente (04/07/05)***

- En una de las cámaras existe un desnivel en la entrada de los montacargas de aproximadamente 3 cm por la pérdida del material cementante (pasta). Ver fotografía 5.3.



***Fotografía 5.3. Pérdida de pasta de cemento en zona de ingreso de montacargas (04/07/05)***

- La curva sanitaria de mortero, se encuentra totalmente destruida en todas las cámaras. Además, las zonas que se encuentran cerca de las paredes se encuentran visiblemente delaminadas. Ver fotografías 5.4. y 5.5.



***Fotografía 5.4. Área alrededor de paredes delaminada (04/07/05)***



***Fotografía 5.5. Curva sanitaria completamente destruida (04/07/05)***

- La delaminación dificulta la limpieza del piso. Ver fotografía 5.6.



***Fotografía 5.6. Delaminación dificulta la limpieza del piso (04/07/05)***

- Se observan juntas de construcción dentro de las cámaras y en la antecámara, aproximadamente cortadas a cada 3 m.

- Las juntas de construcción en la antecámara o pasillo, se observan en un estado aceptable.
- En el pasillo de acceso o antecámara, se observa un deterioro mínimo.
- No se aprecia la existencia de ningún tipo de recubrimiento o tratamiento superficial de tipo epóxico o polimérico.
- No se observa ningún sistema de drenaje superficial de la losa que sirva para canalizar el agua de limpieza.
- Al colocar la mano en la salida de las tuberías de ventilación que se conectan con los bloques de concreto se percibe la salida de aire frío y húmedo.
- Las cámaras se encuentran la mayoría del tiempo congeladas, por lo que la superficie del piso se encuentra escarchada, lo cual dificulta la inspección. Ver fotografía 5.7.



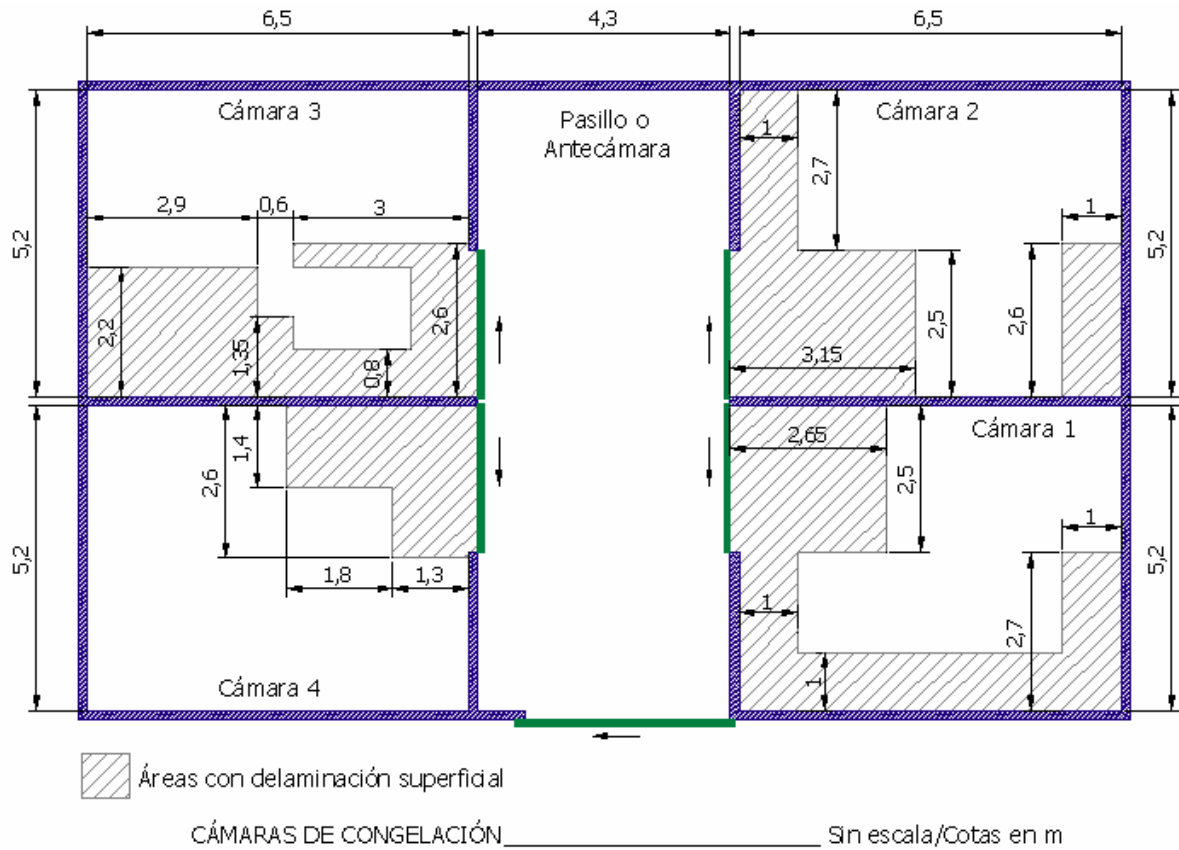
***Fotografía 5.7. Losa congelada que dificulta la inspección (04/07/05)***

*Mediciones y exploración no destructiva*

Se debe destacar que las cámaras están en funcionamiento durante la inspección, por lo tanto contienen producto almacenado y se encuentran con el piso congelado a unos - 5 °C. Por esta razón se hace necesario utilizar la piqueta para delimitar las áreas con vacíos

y delaminaciones. Con la piqueta se aplica el método no destructivo de **impacto acústico con martillo**, el cual consiste en escuchar el sonido que despiden los elementos al ser golpeados por el martillo para localizar las discontinuidades en la masa de concreto. Este método no permite determinar el estado de deterioro interno de la losa, solamente permite distinguir las zonas afectadas por la delaminación superficial.

Las áreas que presentan delaminaciones superficiales en cada cámara se muestran en la figura 5.4.



**Figura 5.4. Áreas con delaminación superficial**

### 3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura

- La losa de piso presenta daños por los efectos causados por los ciclos repetitivos y acelerados de hielo y deshielo. A medida que baja la temperatura, el agua que se encuentra dentro de los poros del concreto endurecido y saturado, se congela y se expande. La expansión del agua dentro de los poros al congelarse, junto con la difusión de la misma dentro de la pasta de cemento, provoca un aumento de volumen que produce un

incremento en los esfuerzos de tracción entre la pasta y los agregados. Según la información suministrada por el Departamento de Mantenimiento, la losa no se diseñó con aire intencionalmente incluido, por lo que el espacio para la expansión del agua interna, es limitado.

- La resistencia de una losa de concreto a la acción del hielo y deshielo, depende tanto de factores internos de diseño, como de factores del microclima que rodea a la estructura. Entre los factores internos se encuentran: el contenido de agua del concreto, la permeabilidad y el sistema de poros de la pasta endurecida. Los principales factores del microclima que inciden en la resistencia son: la tasa de cambio de temperatura para llevar a cabo el hielo y deshielo, la frecuencia de los ciclos y la humedad ambiental.

- Las manifestaciones externas de la patología del tipo físico "hielo - deshielo" son: la formación de micro fisuras paralelas a la superficie de la losa, la desintegración o delaminación de la pasta de cemento y la exposición de los agregados. Este patrón longitudinal de fisuras produce un deterioro interno que afecta la capacidad estructural de la losa para soportar el tránsito de los montacargas.

- Dentro de las cámaras se dan cambios de temperatura que agudizan los efectos del hielo - deshielo. Se pasa de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (diferencia de  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en un intervalo de tiempo de apenas unas seis horas, por lo que la tasa de cambio es de unos  $9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ . Dichos cambios de temperatura, según el criterio de Sánchez de Guzmán (2003), se pueden considerar como choques térmicos lo suficientemente agresivos como para agrietar cualquier elemento de concreto.

- El agua superficial se congela a la temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que el agua que se encuentra dentro de los capilares inicia su congelamiento y expansión entre los  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, si las cámaras operan a una temperatura mínima de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el agua dentro de la matriz de concreto, sin duda se encuentra congelada totalmente.

- Se descarta la influencia de ataque químico o de ácidos sobre el concreto de la losa, ya que los productos alimenticios que se almacenan dentro de las cámaras, se encuentran en recipientes herméticamente sellados y si se producen derrames accidentales se procede a limpiarlos rápidamente. Además, los productos utilizados para la limpieza son jabones industriales, los cuales son de carácter básico que se aplican en periodos cortos de tiempo por lo que representan un agente poco agresivo para el concreto.

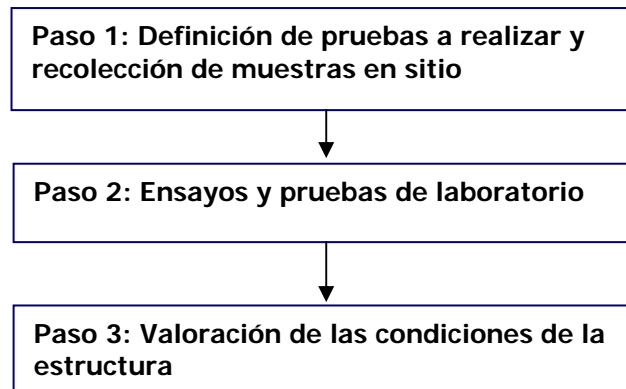
- Se considera que la abrasión provocada por el tránsito de los montacargas es moderada, al contar éstos con llantas de hule. La evidente pérdida de material cementante y delaminación en las zonas de paso de los montacargas dentro de las cámaras se debe a que la carga repetitiva acelera el agrietamiento originado por los cambios volumétricos de la acción de hielo – deshielo, ya que una matriz de concreto agrietada no ofrece la resistencia requerida, al disminuir el módulo de elasticidad la rigidez y aumentar considerablemente la deformación. Esta afirmación se respalda, porque en que la zona de antecámara o pasillo, que no se encuentra sometida a ciclos de hielo-deshielo, no se observa un deterioro considerable, a pesar de que es en donde se presenta un mayor tránsito de los montacargas.

- Las tarimas de madera, que se utilizan para almacenar los recipientes de los productos, tienen clavos en su base que pueden llegar a provocar daños mecánicos por abrasión en la superficie de la losa.

- Debido a que no se conoce la condición interna de la losa, es necesario realizar un análisis destructivo (Nivel 2), para cuantificar la magnitud del deterioro interno.

## ***2.2. Nivel 2: Análisis destructivo***

En la figura 5.5. se muestra el orden de los pasos requeridos para ejecutar el Nivel 2 de diagnóstico aplicado a el caso de estudio de la losa de las cámaras de congelación.



***Figura 5.5. Nivel 2: Análisis destructivo aplicado al caso de estudio de la losa de cámaras de congelación***



### 1. Paso 1: Definición de pruebas a realizar y recolección de muestras en sitio

Se decide sacar núcleos de concreto de la losa de piso correspondiente a por lo menos tres de las cuatro cámaras de congelación, en las zonas en donde se observa mayor desintegración superficial.

Las cámaras de congelación se encuentran en operación, por lo que se hace imposible realizar una exploración destructiva de mayores dimensiones, que permita observar el estado de la barrera de vapor, del aislante de poliuretano y de los bloques de ventilación.

### 2. Paso 2: Ensayos y pruebas de laboratorio

Los núcleos se toman siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 42. Las muestras recolectadas con los núcleos de concreto se utilizan para realizar el ensayo de laboratorio de falla a la compresión simple. En la tabla 5.1. se presentan los resultados de la prueba junto con las observaciones de las muestras.

**Tabla 5.1. Resultados de falla a la compresión simple de los núcleos de concreto (ASTM C42)**

No. MUESTRA	ALTURA (cm)	DIAMETRO (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	CARGA (Kg)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	FACTOR DE CORRECCIÓN POR DIMENSIÓN	RESISTENCIA CORREGIDA (kg/cm <sup>2</sup> )
1 Cámara 1	10,0	10,0	78,5	15400	196	0,87	171
2 Cámara 4	10,0	10,0	78,5	12000	153	0,87	133
3 Cámara 3	10,0	10,0	78,5	16600	211	0,87	184

Observación: el núcleo No. 2 extraído de la losa de piso de la cámara de congelación 4, se encuentra fisurado en forma longitudinal a la losa, o sea perpendicularmente a la altura de la muestra. Los otros dos núcleos presentan el mismo patrón de fisuras, pero en menor grado.

**Fuente:** Informe #05-06-2706 del Laboratorio de materiales Castro & De la Torre  
(Ver Apéndice 1)

### 3. Paso 3: Valoración de las condiciones de la estructura

- Por el tipo de fisura longitudinal observada en los núcleos se concluye que la causa principal de la disminución en la resistencia y del deterioro interno sufrido por la losa de piso, es la acción de los ciclos de hielo – deshielo a los que está sometida.

- La resistencia de diseño de la losa existente, según el Departamento de Mantenimiento, fue de 300 kg/cm<sup>2</sup>. Tomando en cuenta los resultados presentados en la tabla 5.1., la resistencia a la compresión ha disminuido entre un 39% (cámara 3) y un 56% (cámara 4), o que la losa nunca alcanzó esa resistencia.

- En los núcleos se observa desintegración avanzada en la parte inferior, lo que señala la presencia de humedad atrapada entre la barrera de vapor de plástico y la capa aislante de poliuretano.

- La desintegración de la pasta de cemento, la delaminación superficial y las fisuras, provocan pérdida de resistencia, por lo que la losa no cuenta con las condiciones necesarias para cumplir con los requerimientos mínimos para el tránsito de montacargas y las labores de limpieza. La desintegración de la superficie de la losa de piso, puede provocar accidentes en donde se ponga en peligro la integridad física de los operadores de los montacargas y se produzcan pérdidas de producto. Además, se generan problemas de higiene al no contar con la curva sanitaria y no poder limpiar adecuadamente la superficie.

- Con base en lo expuesto anteriormente, se recomienda reconstruir la losa de concreto reforzado siguiendo: las recomendaciones de diseño por durabilidad para la acción física de hielo – deshielo, los pasos del sistema de reparación y las sugerencias para el mantenimiento y protección. Cuando se remueva la losa existente se debe proceder a determinar el estado de la barrera de vapor, de la capa aislante de poliuretano y de los bloques de ventilación, ya que si existe acumulación de humedad deben ser sustituidos todos esos elementos antes de reconstruir la losa de concreto.

### **3. DISEÑO CORRECTIVO POR DURABILIDAD**

#### ***3.1. Periodo de servicio de la losa de piso de las cámaras de congelación***

La vida útil de servicio de la losa de piso, se puede considerar aproximadamente de dos años, lo cual es inferior a lo previsto por el propietario, ya que la vida útil se refiere al periodo de tiempo en el cual la estructura conserva las condiciones de seguridad, funcionalidad y estética previstas en el diseño.

La vida útil última o total, se define como el periodo comprendido desde la vida útil de servicio, hasta el momento en que se presenta el colapso parcial o total de la estructura.

La vida residual de una obra, inicia cuando la seguridad disminuye porque la demanda de cargas de servicio (estáticas y dinámicas) es mayor que la capacidad de los elementos, la funcionalidad se ve disminuida al presentarse deformaciones excesivas, fisuras y pérdidas de masa. Por lo tanto, se considera que la losa de piso de las cámaras de congelación en cinco años de servicio, se encuentra superando el periodo de vida útil y está iniciando la etapa de vida residual.

### ***3.2. Especificaciones de diseño por durabilidad para acciones provocadas por agentes físicos (el caso de hielo – deshielo)***

Para resistir acciones físicas que provocan cambios volumétricos como es el caso hielo – deshielo, es necesario seguir las recomendaciones de diseño propuestas en la sección 4 del apartado 3.2. del capítulo 3.

## **4. SISTEMA DE REPARACIÓN**

En la figura 3.5. se muestra un diagrama con la metodología de reparación que se seguirá en el estudio de la losa de piso perteneciente a las cámaras de congelación industrial. A continuación se presenta el desarrollo de dicha metodología de reparación.

### ***4.1. Paso 1: Determinación de las bases de diseño (BDD)***

Las necesidades del usuario y los requisitos que debe cumplir la losa son los siguientes:

1. Vida útil esperada: la reconstrucción completa de la losa de las cámaras debe ofrecer las condiciones óptimas de servicio durante un periodo mínimo de cinco años con un mantenimiento preventivo semestral.

2. Urgencia de la reparación: el Departamento de Mantenimiento cuenta con el visto bueno del Departamento de Producción para reparar dos de las cuatro cámaras durante una semana y media, ésta restricción de tiempo impuesta por el usuario limitan la vida útil y las técnicas de reparación empleadas en la reconstrucción de la losa.

La reconstrucción de las cuatro cámaras de congelación requiere unas seis semanas, de las cuales dos semanas se utilizarían para demoler la losa existente, sustituir la barrera de vapor, la capa de poliuretano y los bloques de ventilación dañados y construir la losa

reforzada; las otras cuatro semanas se destinan para el fraguado y curado del concreto de la losa.

Al disponerse tan solo con semana y media, se decide reparar estrictamente las zonas afectadas por la delaminación superficial en dos de las cuatro cámaras, específicamente las cámaras 3 y 4. En la figura 5.4. se muestra el área crítica a reparar. En dichas zonas de reparación se procederá a demoler la losa existente, sustituir la barrera de vapor de plástico y reconstruir el área con concreto reforzado. Esta reparación constituye una solución temporal (más de carácter cosmético que curativo), por lo que se infiere que la vida útil de las zonas reparadas va a ser inferior a la vida útil esperada de cinco años.

3. Costo de la reparación: tomando en cuenta que no se tiene el tiempo necesario para realizar la reconstrucción completa de la losa de las cámaras, se debe ejecutar una reparación temporal de bajo costo, cuya duración se adapte al tiempo disponible y que solucione los problemas de delaminación en las áreas críticas.

4. Condiciones de la superficie o elemento estructural: el área a reparar es de unos 20 m<sup>2</sup>, el espesor de la losa es de unos 10 cm, el refuerzo es de malla No. 3 @ 15 cm, se ubica en la zona de ingreso de las cámaras a más de 50 m de la entrada principal de la planta de almacenamiento.

5. Importancia estructural del elemento o miembro: la losa de piso de las cámaras tiene importancia para la seguridad ocupacional de los que manejan los montacargas y para garantizar las condiciones higiénicas de las áreas de la planta dedicadas al almacenamiento de productos alimenticios.

6. Funcionalidad del miembro: la función operativa principal que cumple la losa dentro de las cámaras de congelación es la de ser superficie de tránsito y de soporte para los recipientes de producto almacenado.

7. Estética o apariencia: la losa requiere ser sólida, hermética, impermeable, plana y poco rugosa.

8. Capacidad estructural o de carga requerida: los esfuerzos que debe soportar la losa son los generados por la acción física de hielo – deshielo y por la acción mecánica de la abrasión.

9. Efectos secundarios de la reparación: la reparación de la losa de piso puede afectar la integridad de los elementos circundantes, tales como: las resistencias eléctricas de las puertas que se utilizan para evitar que éstas se congelen, los sellos de las puertas, los paneles de las paredes, los elementos de protección contra los choques de las paredes y la capa de aislamiento de poliuretano.

10. Seguridad e impacto ambiental del proceso de reparación: se producirá ruido, escombros, polvo, derrames de concreto fresco que afecta las condiciones higiénicas de la planta. Además, los trabajadores que ejecutan la reparación están expuestos a sufrir accidentes provocados por los montacargas que circulan dentro de la planta.

#### **4.2. Paso 2: Diseño del sistema de reparación**

##### **1. Propiedades del material**

a) Esfuerzo de unión: considerando que la falla en los puntos de unión entre la reparación y el elemento existente, se debe a esfuerzos térmicos diferenciales y a la contracción por secado, se debe emplear un material con un coeficiente térmico similar al concreto existente en la losa, principalmente porque dentro de las cámaras se sufren cambios de temperatura de hasta 55 °C.

El comportamiento dimensional del área de losa reparada (nueva), se debe controlar de la siguiente manera:

- Utilizar concreto para la reparación, con lo que se asegura que los coeficientes térmicos y los módulos de elasticidad (E) de la superficie reparada y la existente son compatibles.
- Diseñar una mezcla con una baja relación A/C para disminuir la contracción por secado.

b) Durabilidad: el material debe ser especificado para que resista las condiciones de servicio y el medio ambiente dentro de las cámaras, por lo que el concreto de reparación se debe diseñar siguiendo las recomendaciones para resistir la acción de los ciclos de hielo – deshielo.

c) Constructibilidad: se debe procurar ejecutar la reparación dentro del tiempo disponible por el Departamento de Producción, por lo que el material de reparación debe tener las siguientes características:

- Fluidez para penetrar y llenar cavidades.
- Tiempo mínimo de mezclado, colocación y acabado superficial.
- Capacidad de ganar resistencia en ocho días para la puesta en servicio.

## **2. Selección de materiales de reparación**

Tomando en cuenta las propiedades esperadas del material de reparación para cumplir con las bases de diseño (BDD), el material seleccionado es un concreto diseñado conforme a las especificaciones de diseño correctivo por durabilidad para la acción de hielo – deshielo, presentadas en la sección 3.2. del capítulo 3.

## **3. Preparación de superficie**

La superficie de adherencia es la zona de unión entre el concreto existente y el concreto de reparación, dicha superficie se producirá mediante el corte con disco metálico, por lo que la rugosidad se considera óptima para la adherencia entre los concretos, siempre y cuando se proceda a retirar el exceso de partículas de polvo producidas durante el corte.

### ***4.3. Paso 3: Planos constructivos y especificaciones***

#### **1. Planos constructivos**

Ver planos en apéndice 2.

#### **2. Especificaciones de diseño**

1. La mezcla de concreto debe cumplir con las siguientes características:
  - Modulo de rotura de 40 kg/cm<sup>2</sup>.
  - Inclusión de aire entre un 6%, mediante aditivo aprobado por la inspección.
  - A/C = 0,45.

- Aditivo reductor de agua y plastificante de alto rango (tipo F) aprobado por la inspección.
- Revenimiento sin aditivo plastificante de 70 – 80 mm.
- Revenimiento con aditivo de 120 mm.
- Agregado grueso con tamaño máximo entre 25,4 y 38,1 mm, curva granulométrica continua, cada malla con aproximadamente 15% retenido.
- Contenido mínimo de cemento de 325 kg/m<sup>3</sup>.

2. Las juntas entre el concreto nuevo y el concreto existente se deben cortar con sierra tan pronto endurezca el concreto (corte húmedo). El relleno de dichas juntas se hará con un material epóxico semi rígido, aprobado por la inspección, con capacidad de elongación del 100% y se colocará a los 28 días después de colado el piso.

3. El acabado de piso será clase 6, según la clasificación de la tabla 2.1 del ACI 302.1R-04 (2004).

5. Los factores de planicidad  $F_f$  y  $F_L$  serán:  $\frac{F_f}{F_L} = \frac{30}{20}$  (según ASTM E1155).

4. El curado del concreto se hará con membrana aprobada por la inspección y que cumpla con la norma ASTM C309.

#### ***4.4. Paso 4: Consecución del diseño***

##### **1. Selección del contratista**

Se analiza el contenido de las ofertas correspondientes a varias empresas constructoras y se procede a recomendar la compañía que la inspección considera técnica y económicamente apropiada para cumplir con las demandas del proyecto (BDD, especificaciones y diseño geométrico). Además, los contratistas deben acatar las disposiciones legales y de seguridad ocupacional dentro del inmueble.

##### **2. Ejecución de la reparación**

Con base en recomendaciones del ACI RAP-7 (2005) para la reparación de superficies horizontales de concreto, se ejecuta la reparación con el material que cumple

con las especificaciones y siguiendo el plano. A continuación se presentan cada uno de los pasos de reparación con su respectiva fotografía:

a) Paso 1: Localizar, identificar y definir los límites del área a reparar, haciendo uso de algún método de inspección de estructuras.



***Fotografía 5.8. Paso 1. Delimitación de áreas críticas (26/08/05)***

b) Paso 2: Remover el concreto deteriorado utilizando corte con sierra de disco metálico y martillo neumático.



***Fotografía 5.9. Paso 2. Remoción del concreto deteriorado (26/08/05)***



c) Paso 3: Preparar la superficie de los límites del área a reparar, verificando que la superficie tenga la rugosidad necesaria para adherencia entre el concreto existente y la mezcla fresca. Limpiar la superficie de adherencia, el acero expuesto, los límites y las juntas. Verificar que los poros del concreto se encuentren libres y abiertos para recibir el concreto de reparación. Controlar la humedad del sustrato o base, para asegurar las condiciones adecuadas de unión.

En la fotografía 5.11. se observa que la zona de contacto con la barrera de vapor y con la capa aislante de poliuretano se encuentra desintegrada por la humedad que se acumula en esta zona.



***Fotografía 5.10. Paso 3. Superficie recién cortada (29/08/05)***

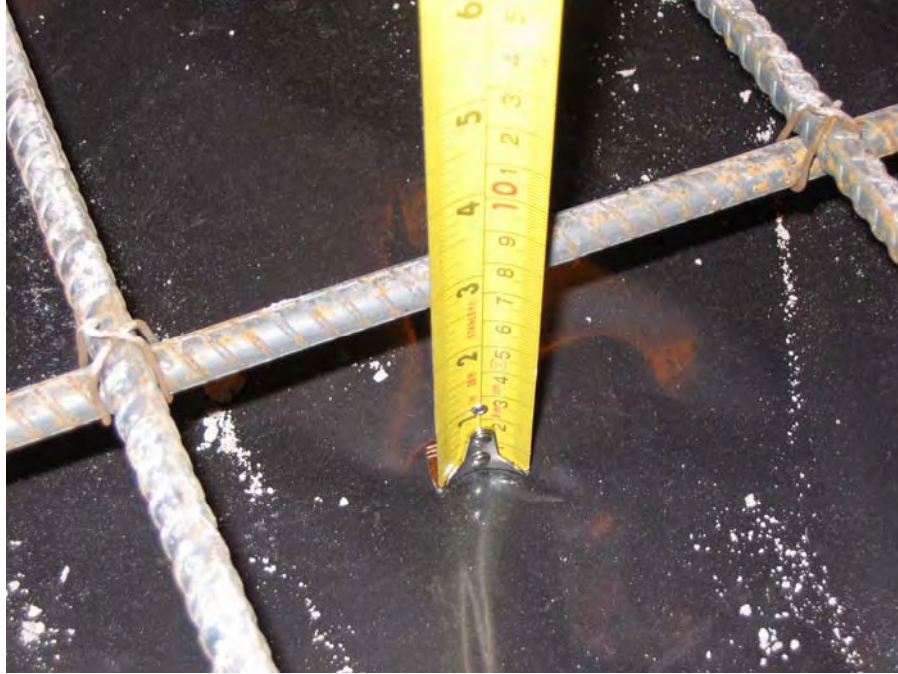


**Fotografía 5.11. Paso 3. Limpieza de superficie (29/08/05)**

- d) Paso 4: Instalar el refuerzo de acero antes de colar el concreto a unos 6 cm desde la parte inferior.



**Fotografía 5.12. Paso 4. Colocación del refuerzo de reparación (30/08/05)**



**Fotografía 5.13. Paso 4. Refuerzo de reparación a 6 cm de la base (30/08/05)**

e) Paso 5: Colocación del concreto de reparación.



**Fotografía 5.14. Paso 5. Colocación del concreto de reparación (31/08/05)**

## 5. CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

### *5.1. Control del concreto en estado fresco*

Se controlan los siguientes aspectos para verificar que la mezcla de concreto utilizada cumpla con las especificaciones de diseño:

1. Se procede a revisar la hoja de fabricación del concreto, para verificar el tamaño máximo de agregado y que se cuenten con los aditivos fluidificante y el inductor de aire especificados por el diseño.
2. Se mide el revenimiento del concreto sin aditivos, según ASTM C143.



***Fotografía 5.15. Medición de revenimiento sin aditivos (31/08/05)***

3. Se mide la temperatura antes de la colocación, para verificar que no supere los 35°C , según ASTM C1064.



***Fotografía 5.16. Medición de la temperatura (31/08/05)***

4. Se procede a inspeccionar visualmente los agregados, con el objetivo de determinar el tamaño máximo y distinguir los diferentes tamaños consecutivos y así verificar si la granulometría es continua.



***Fotografía 5.17. Inspección visual de agregados (31/08/05)***

5. Después de incorporar los aditivos a la mezcla según las especificaciones y recomendaciones del fabricante, se debe medir de nuevo el revenimiento, para determinar si la mezcla tiene la trabajabilidad requerida para el sistema de colocación.



**Fotografía 5.18. Revenimiento con aditivos (31/08/05)**

6. Se determina el contenido de aire de la mezcla, para verificar que esté de acuerdo con las especificaciones, según ASTM C231.



**Fotografía 5.19. Medición del contenido de aire (31/08/05)**



**Fotografía 5.20. Cinco por ciento de contenido de aire (31/08/05)**

7. Se fabrican tres cilindros y tres vigas de falla para los 3 m<sup>3</sup> de concreto utilizados en la reparación, con el objetivo de determinar la resistencia a compresión y flexión a diferentes edades (7, 14 y 28 días), según ASTM C31.



**Fotografía 5.21. Fabricación de las vigas y cilindros de prueba (31/08/05)**

### ***5.2. Control de la colocación y compactación del concreto***

Para controlar la colocación y compactación del concreto se procede a inspeccionar el proceso de vibrado, procurando que no se presente segregación en la mezcla, evitando que exista contacto directo entre el vibrador y las barras de refuerzo. Además, se dispone que la congelación de las cámaras se lleve a cabo siete días después del colado, con el fin de evitar que el concreto con menos de 24 horas de edad sufra un choque térmico.

Para el proceso de curado se recomienda el uso de membranas curadoras o sistemas de curado durante los primeros siete días de colado, para disminuir la posibilidad de que se produzca agrietamiento por contracción por secado.

Por último, se impide el tránsito de montacargas y de personas sobre la losa reconstruida durante los primeros siete días de edad del concreto.

### ***5.3. Control de calidad por medio de pruebas y ensayos***

En el Apéndice 3 se muestran los resultados de los ensayos a compresión simple y de módulo de rotura a los 7 días de edad de los cilindros y vigas de prueba. Para la viga fallada se alcanza un M.R. (módulo de rotura de falla) de 42 kg/cm<sup>2</sup> y el cilindro soporta una carga de 259 kg/cm<sup>2</sup>.

En el Apéndice 4 se presentan las características de diseño de mezcla, tales como: curva granulométrica, procedencia, combinación, peso seco, gravedad específica, absorción y módulo de finura de los agregados, relación A/C, porcentaje de aire incluido, cantidad de agua, cantidad de cemento y tipo de aditivos.

## **6. MANTENIMIENTO Y PROTECCIÓN**

Se recomienda implementar un proceso de limpieza que incluya el secado de todos los residuos de agua que se depositan en la superficie del piso luego del lavado, para evitar que el agua de limpieza penetre a lo interno de la losa y se congele.

La curva sanitaria, debe ser construida con un mortero de alta resistencia y se debe recubrir con una pintura epóxica o polimérica para impermeabilizar su superficie.

Es imprescindible hacer modificaciones al procedimiento de deshielo de las cámaras; ya que la tasa de cambio de temperatura de 9 °C/ hr que se emplea por lo menos una vez



al mes, es nociva para cualquier concreto de alto desempeño. Se recomienda, utilizar una tasa de cambio de 3 °C/ hr; con lo que se tardaría aproximadamente unas 18 horas en pasar de la temperatura mínima de - 40 °C a 15 °C. Además, se recomienda evitar el uso gas caliente con el fin de acelerar el proceso de descongelamiento, ya que esto produce un choque térmico que agrava el agrietamiento.

Se debe evitar el uso de artículos o herramientas abrasivas que deterioren la superficie de la losa, tales como punzo cortantes para remover la escarcha o hielo.

Para evitar la penetración de agua dentro de los poros del concreto de la losa, se recomienda aplicar superficialmente una capa de unos 6mm de poliuretano cementicio que soporte abrasión, impacto y choque térmico. La aplicación del tratamiento superficial se debe realizar siguiendo las recomendaciones técnicas del fabricante.

# CAPITULO 6

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. CONCLUSIONES

La principal conclusión es que los ingenieros civiles de Costa Rica, no han establecido normativa que trate aspectos de durabilidad, reparación y mantenimiento de estructuras de concreto. Por consiguiente, al no existir normativa, no se cuenta con equipo de ensayo y laboratorios especializados que sirvan como instrumento para realizar estudios técnicos sobre estos temas. A continuación, se puntualizan cada una de las conclusiones que se derivan del trabajo de investigación realizado y de la aplicación del método propuesto para la detección, tratamiento y prevención de patologías:

- No se cuenta con normativa que incluya especificaciones de diseño por durabilidad, procedimientos de reparación y de mantenimiento de estructuras de concreto.
- No existe equipo de ensayo y laboratorios de materiales para realizar pruebas que caractericen las propiedades del concreto, necesarias para determinar el desempeño por durabilidad del mismo. La información generada por las pruebas de laboratorio son esenciales para llevar a cabo estudios técnicos de Patología Estructural.
- El profesional debe tener en cuenta que la estructura interactúa con el medio ambiente circundante, por lo que el diseño no solo debe considerar aspectos de resistencia estructural; debe conocer que existen acciones químicas, físicas, mecánicas y biológicas que se deben contemplar.
- El concreto sufre patologías provocadas por agentes que forman parte de su composición. Las patologías producidas por agentes internos son: reacción álcali – agregado (RAA), formación de etringita diferida (FED) y contracción por secado.
- Las patologías del concreto tienen su origen no solamente en la etapa de operación, además pueden generarse en la etapa de diseño y construcción de la obra.
- En nuestro país, el mantenimiento preventivo es deficiente en la mayoría de las obras de infraestructura tanto civil como industrial. Generalmente, el mantenimiento que se aplica es del tipo correctivo, lo que trae repercusiones económicas negativas.

- El diseño preventivo por durabilidad en estructuras nuevas está ligado los conceptos de ingeniería de valor, los cuales definen que las decisiones tomadas en las fases de planificación del proyecto tienen una relación beneficio/costo mayor que las decisiones que se toman durante la fase constructiva u operativa.

- La metodología propuesta en este trabajo ofrece al medio profesional una alternativa práctica para la detección, tratamiento y prevención de patologías en estructuras de concreto.

## **2. RECOMENDACIONES**

Producto de la investigación realizada y de la aplicación del método de detección, tratamiento y prevención de patologías propuesto, se generan las siguientes recomendaciones:

- Establecer normativa que tome en cuenta el diseño por durabilidad y las patologías del concreto.

- Utilizar un método práctico, como el Método de Tres Niveles, para la evaluación del estado de deterioro de las estructuras de concreto.

- Adquirir equipo de ensayo y mejorar la infraestructura de los laboratorios de materiales para realizar los análisis que se proponen en el Método de Tres Niveles.

- Normalizar los métodos de reparación y mantenimiento de las estructuras de concreto.

- Validar la normativa, los métodos de diagnóstico, los procedimientos de reparación y mantenimiento, mediante la aplicación éstos en diferentes casos de estudio.

- Integrar los resultados del análisis estructural y del análisis por durabilidad en proyectos que se encuentran en la etapa de diseño.

- Realizar un estricto control de calidad de los materiales y de los métodos constructivos e implementar un sistema de mantenimiento preventivo cuando el proyecto está en construcción.

- Aplicar una metodología sistemática como la propuesta para detectar y tratar patologías, cuando el proyecto se encuentra en operación.
- Realizar estudios que caractericen los medios ambientes agresivos en el país, como los marinos y los contaminados por gases producto de la combustión.
- Aplicar especificaciones de diseño por durabilidad en proyectos que se encuentran en ambientes agresivos; en especial los marinos, industriales y ciudades con atmósferas corrosivas.
- Establecer un manual de mantenimiento y protección de los elementos de concreto para cada obra de infraestructura industrial y civil. El manual debe adaptarse a la importancia operativa de la estructura y a la agresividad del medio ambiente que la rodea, además incluir los siguientes aspectos básicos:
  - Inspecciones periódicas en donde se aplique una metodología de diagnóstico como el Método de Tres Niveles para detectar las causas que provocan las patologías.
  - Sistemas de reparación siguiendo las recomendaciones del ACI 546 (2001), del ICRI (1996-1997) y de Emmons (1993).
  - Procedimientos o listas de control de calidad de las reparaciones.
  - Métodos de protección de las superficies de concreto reparadas.
  - Cambios en las circunstancias operativas que ponen en riesgo la durabilidad de los sistemas de concreto estructural.
- Incluir en los contenidos de los cursos de concreto y de materiales de construcción los conceptos de diseño por durabilidad, para que el estudiante conozca las patologías del concreto y una metodología básica para la detección, tratamiento y prevención de las mismas.
- Crear conciencia en el ingeniero sobre el tema de durabilidad, diagnóstico y reparación, por medio de capacitación por parte de la industria del concreto, de aditivos y asociaciones de profesionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. AATH (Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón). **Durabilidad del hormigón estructural.** La Plata, Argentina; 2001.
2. ACI Committee 201. **ACI 201.2R-92: Guide to durable concrete.** American Concrete Institute; 1999.
3. ACI Committee 228. **ACI 228.2R-98: Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures.** American Concrete Institute; 1999.
4. ACI Committee 301. **ACI 301-05: Specifications for structural concrete.** American Concrete Institute; 2005.
5. ACI Committee 302. **ACI 302.1R-04: Guide for concrete floor and slab construction.** American Concrete Institute; 2004.
6. ACI Committee 318. **ACI 318-02: Building code requirements for structural concrete and commentary.** American Concrete Institute; 2002.
7. ACI Committee 364. **ACI 364.1R-94 (Reapproved 1999): Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation.** American Concrete Institute; 1999.
8. ACI Committee 546. **ACI 546R-96 (Reapproved 2001): Concrete repair guide.** American Concrete Institute; 2001.
9. ACI Committee E 706. **Spall repair of horizontal concrete surfaces. (ACI RAP-7)** American Concrete Institute; 2005.
10. ACI - ICRI. **Concrete Repair Manual.** American Concrete Institute, International Concrete Repair Institute; 1999.
11. CASTRO BORGES, Pedro. **Corrosión en estructuras de concreto armado.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México, D.F.; 1998.
12. CCC Dirección de Capacitación. **Concretos de alto desempeño.** Cámara Costarricense de la Construcción, San José; 2004.

13. CHAVES ROJAS, Gonzalo. **Procedimientos para el estudio de patología del concreto**. Informe final de proyecto de graduación. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica; 2001.
14. DIVET, L. **“Formación diferida de etringita en los hormigones de obras masivas”**. En Boletín del Laboratorio de Puentes y Carreteras, Francia, No. 244-245 (Mayo – Agosto 2003), pp. 91-111.
15. EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance Illustrated**. R.S. Means Company, Estados Unidos; 1993.
16. FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Manuel. **“Prevenir o curar: una decisión no siempre fácil”**. En Revista Noticreto de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Colombia, No. 72 (Agosto – Octubre 2004), pp. 30-36.
17. *fib* (fédération internationale du béton). **El hormigón estructural y el transcurso del tiempo**. Volumen 1 y 2. Memorias del Simposio fib La Plata, Argentina; 2005.
18. HELENE, Paulo y PEREIRA, Fernanda. **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección**. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Bandeirantes Industria Gráfica. Guarulhos, Brasil; 2003.
19. ICRI. **Technical Guidelines: Guide for selecting and specifying materials for repair of concrete surfaces**. No. 03733. International Concrete Repair Institute, Virginia; 1996.
20. ICRI. **Technical Guidelines: Selecting and specifying concrete surface preparation for sealers, coatings and polymer overlays**. No. 03732. International Concrete Repair Institute, Virginia; 1997.
21. JONES, Denny A. **Principles and prevention of corrosion**. Segunda Edición. Prentice Hall, Estados Unidos; 1996.
22. MEHTA, P. Kumar y MONTEIRO, Paulo J.M. **Concrete, microstructure, properties and materials**. Editorial McGraw-Hill Company. New York; 1993.
23. National Highway Institute. **Estabilidad de cauces y socavación de puentes**. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation; 1999.

24. NEVILLE, Adam M. **Tecnología del Concreto.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México; 1999.
25. PIEDRAHITA, Adriana P. **“Patologías por acciones biológicas”.** En Revista Noticreto de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Colombia, No. 70 (Febrero – Abril 2004), pp. 42-50.
26. RENDELL, Frank et. al. **Deteriorated concrete. Inspection and physicochemical analysis.** Thomas Telford Books, Londres; 2002.
27. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. **Durabilidad y patología del concreto.** Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Colombia; 2002.

# APÉNDICES



## 1. INFORME DEL ENSAYO DE LOS NÚCLEOS DE CONCRETO

## 2. PLANOS CONSTRUCTIVOS DE LA REPARACIÓN

### **3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A LAS CILINDROS Y VIGAS**

#### 4. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE MEZCLA



**CASTRO**

**&**

ingenieros consultores

**De la Torre, S. A.**

TELS.: 232-2273  
FAX: 296-0076 E-Mail: castorre@castroydelatorre.com

APARTADO: 5462-1000  
SAN JOSE - COSTA RICA

**INFORME #05-06-2706**

San José, 01 de Junio del 2005.

Estimado ingeniero:

A su solicitud nos permitimos presentar los resultados obtenidos de la extracción de 3 núcleos de concreto, extraídos el día: 28 de Mayo del presente año, con broca de punta de diamante, con diámetros de 100 mm, en la losa de piso de cámaras de refrigeración, del proyecto: , ubicado en Tejar del Guarco, Cartago.

**Falla a la compresión simple de núcleos de concreto: (ASTM C-42)**

M (#)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	L.D	Factor de Corrección	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup> Corregido	Edad (días)	Localización Losa de pisos
1	10.0	10.0	78.5	15400	196	1.00	0.870	171	+28	Cámara de refrigeración # 1
2	10.0	10.0	78.5	12000	153	1.00	0.870	133	+28	Cámara de refrigeración # 4
3	10.0	10.0	78.5	16600	211	1.00	0.870	184	+28	Cámara de refrigeración # 5

NOTA:

El núcleo # 2, extraído de la losa de piso de la cámara de refrigeración # 4, se encuentra con muchas fisuras en forma longitudinal a la losa. Los otros dos núcleos tienen fisuramiento, pero en menor grado.

Quedo a su disposición para cualquier ampliación o aclaración que estimen conveniente.

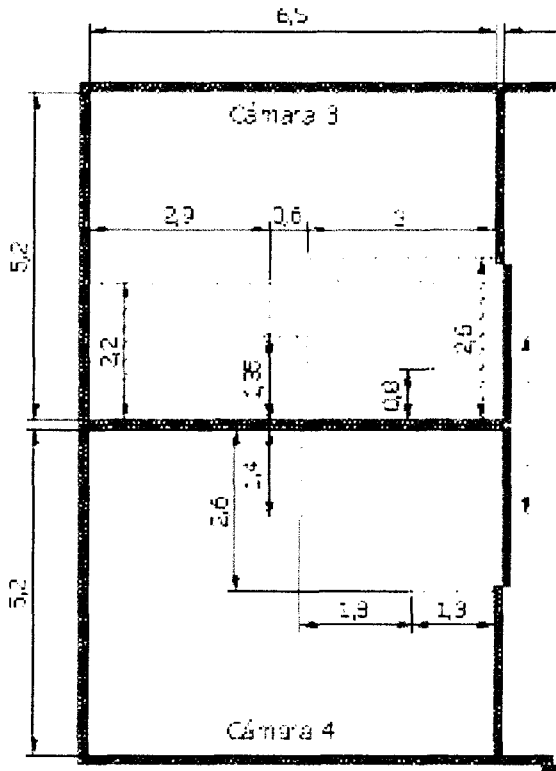
Muy atentamente.

ING. CLAUDIO E. ARAYA M.  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

s Geotécnicos  
de Materiales  
de Pavimento  
ciones Rotación con Diamante

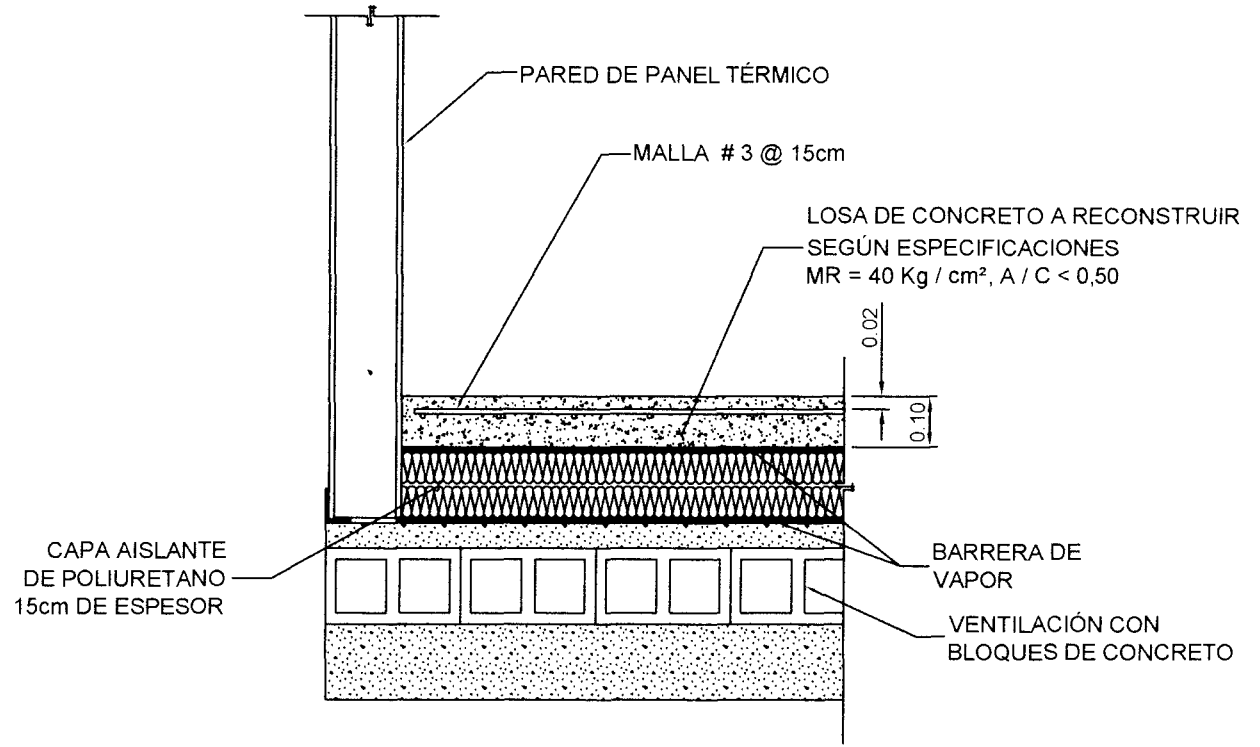
Fundaciones  
Especificaciones  
Inspección

Investigaciones de Laboratorio  
Perforaciones SPT  
Diseños Mezclas Concreto



## AREAS A REPARAR

SIN ESCALA



## DETALLE DE LOSA A RECONSTRUIR

ESCALA \_\_\_\_\_ 1:15

NOTA: COTAS EN METROS

**PROYECTO: REPARACIÓN DE LOSA DE PISO  
CÁMARAS DE CONGELACIÓN INDUSTRIAL**

**CONTENIDO:  
AREAS A REPARAR EN CÁMARAS 3 Y 4  
DETALLE DE LOSA A RECONSTRUIR**

ESCALA INDICADA

AGOSTO 2005

LAM. 1 / 1



San José, 13 Septiembre

Página.1

Ensayo de Compresión a Cilindros de Concreto  
**RESULTADOS**

Obra: **Cartago**

CODIGO OBRA

Cliente:

CODIGO CLIENTE

# Cilindro	Fecha moldeo	Edad falla, dias	Rev., cm	Esfuerzo Falla, Kg/cm2	Esfuerzo Probable, Kg/cm2	M.R Kg/cm2	Tamaño Máximo, mm	Tipo de Concreto
1809	31 Ago	7	11.0	42	56	40	19	O.DIRECTO
1810	31 Ago	28	11.0	0		40	19	O.DIRECTO
1811	31 Ago	28	11.0	0		40	19	O.DIRECTO
1820	31 Ago	7	11.0	259	370		19	O.DIRECTO
1821	31 Ago	28	11.0	0			19	O.DIRECTO
1822	31 Ago	28	11.0	0			19	O.DIRECTO

Comentarios:

O: Muestreo realizado en Obra P: Muestreo realizado en Planta

Atentamente:

Ing. Jose Hernández O.  
Dpto.Ingeniería y Calidad



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y CALIDAD  
 INFORME DE DISEÑO DE MEZCLA

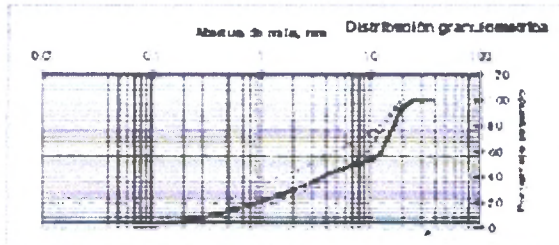
CLIENTE:  
 PROYECTO:  
 Identificación

FECHA: 13 Sep 05  
 OPERARIO: #1

MH Fibrañ AS 18 C78 40 kg/cm<sup>2</sup> 28 días

Curva de recomendación A.C.I.

Materia	Grava 19mm	Arenas rio	Arenas Industriales	Grava 19mm	Grava	Arenas
38	100.0	100.0	100.0	100	100	100
25	100.0	100.0	100.0	100	100	100
19.0	87.0	100.0	100.0	100	80	100
12.5	18.0	100.0	100.0	75	58	82
9.5	8.0	100.0	100.0	61	58	73
4.75	2.0	91.5	85.5	40	44	59
2.06	1.0	78.6	58.9	28	32	47
1.18	1.0	54.8	35.4	18	23	36
0.6	1.0	33.4	24.4	12	15	25
0.3	1.0	13.9	15.1	8	8	15
0.15	1.0	1.7	2.2	4	4	8
0.075	1.0	0.9	1.5	2	2	0
Módulo Finura	6.98	3.28	3.76	3.28	5.28	4.37



PARAMETROS DE DISEÑO

Relación A/C:	0.50
% Aire:	5.0%
% Sobredimension:	3.0%

PROPIEDADES Y DENSIFICACION DE MATERIA PRIMA

Tipo de Materia:	Leocom	Grava 19mm	Arenas rio	Arena Industrial
Origen:	Holcim	Guápiles	Guápiles	Guápiles
% Combinación:		50.9%	26.8%	22.2%
Peso seco kg/m <sup>3</sup> :	370	902	449	882
Gravedad específica G <sub>30</sub> :	2.90	2.65	2.51	2.56
% de Absorción:		2.10%	3.70%	5.31%
M.F.:		6.98	3.28	3.76

AGUA DE LA MEZCLA (litros)

Agua de Diseño	184	Agua de absorción:	48	Agua total	232
	ADITIVOS líquidos		REVENIMIENTO OBRA		
Plastificante con retardador de aire	MR375	2590		100	20
	Aircoc D	1480			

OBSERVACIONES:  
 Los criterios de aceptación del concreto están definidos bajo la especificación ASTM C94 (Concreto Premezclado) y ACI 318 (Evaluación y aceptación del concreto). Contenido de aire S=+1.8%.

ATENCIÓN:

Ing. Jose Hernández Orrego.  
 Depto. Producción