



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN**

**INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:  
PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**T E S I S**  
**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:  
JAIME ESTRADA MENDOZA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JUAN ANTONIO GÓMEZ VELÁZQUEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**ABRIL 2011**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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







---

## DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

### A MIS PADRES

Por su apoyo incondicional, su trabajo y esfuerzo el cual ahora se ve reflejado en la conclusión de esta meta. Gracias por la comprensión y confianza que han tenido en mí, por sus enseñanzas las cuales han tenido una gran influencia en mi vida, por la dedicación y paciencia que me han tenido hasta ahora, gracias por haberme guiado, motivado e impulsado a alcanzar nuevas metas y logros. Madre, Padre, gracias por todo, espero que ahora sus esfuerzos se vean recompensados con este nuevo logro alcanzado.

### A MIS HERMANOS

Lazaro, Ma. Graciela, Lorena Flor, Manuel Alejandro, Miguel Ángel y Selene Guadalupe, por todo el apoyo y paciencia que me han brindado. Gracias por sus opiniones, comentarios y palabras de aliento, gracias por ser una guías en mi vida, gracias por su confianza en esos momentos difíciles de mi vida.

En especial quiero agradecer a mi hermana Lorena Flor, por la confianza y el apoyo brindado durante el transcurso de la carrera, sin el cual no hubiera podido culminar. Gracias hermana por haber hecho ese sacrificio y el cual espero se vea recompensado con la culminación del presente trabajo. Ojala tenga la oportunidad de recompensar tus esfuerzos.

### A MI DIRECTOR DE TESIS

El Ing. Juan Antonio Gómez Velázquez, quien siempre me ha tenido una paciencia incondicional, que me brindado su confianza para concluir ahora este trabajo, y sobre todo que ha demostrado a querer y amar la Ingeniería Civil. Gracias por su preocupación que ha tenido para un servidor y por todo el cumulo de conocimientos que me ha trasmitido.

Gracias por todo el apoyo brindado en esos momentos difíciles, el cual me sirvió como aliciente para proseguir. Gracias Ingeniero Juan Antonio por ser una guía.

### A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Por haberme brindado un sin fin de oportunidades para llevar a cabo mis estudios. Gracias por la haberme albergado dentro de sus aulas e instalaciones donde he aprendido, convivido y he hecho amigos. Gracias por haberme permitido cursar una carrera dentro de sus instalaciones.

Gracias por el apoyo brindado a Fundación UNAM A.C., durante los primeros años de carrera, lo que creó aproveche al máximo.

### A MIS PROFESORES

Por ser partícipes de este logro, a los cuales espero nunca defraudar. Gracias por todas sus enseñanzas y consejos dentro y fuera de las aulas, gracias por tener la paciencia, dedicación y visión que los hace únicos, y sobre todo gracias por la confianza que me han brindado.

---



Gracias a todos los mis profesores de la carrera, los cuales siempre me impulsaron a tener nuevas metas, los cuales tuvieron una gran dedicación y preocupación para hacernos mejores personas. Gracias a aquellos maestros los cuales han influido a que quiera y ame la Ingeniería y general a todos mis profesores que contribuyeron a mi formación académica.

## **A MIS AMIGOS**

Los cuales hemos tenido una meta en común, y que siempre nos hemos respaldado y ayudado, creciendo y madurando académicamente y como personas. Gracias por estar a mi lado en el transcurso de mi vida, por ser mi apoyo, en momentos buenos y malos. Gracias por sus enseñanzas, comprensión, paciencia, que créanme he valorado.

En general a todas aquellas personas que han tenido alguna influencia en mi vida, de las cuales me han dejado alguna enseñanza positiva o negativa.

---



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.</b> . . . . .	<b>3</b>
I.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	3
I.2. ZONIFICACIÓN Y ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSUELO DEL VALLE DE MÉXICO. . . . .	5
I.2.1. SUELO. . . . .	5
I.2.1.1. Minerales constitutivos de las arcillas. . . . .	6
I.2.2. ESTRATIGRAFÍA DE LOS SUELOS LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. . . . .	7
I.2.3. ZONIFICACIÓN DEL SUBSUELOS DEL VALLE DE MÉXICO. . . . .	9
I.3. EFECTOS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO. . . . .	11
I.3.1. HUNDIMIENTO GENERAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO. . . . .	12
I.4. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA CAPACIDAD DE CARGA DE SUELOS. . . . .	13
I.4.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL CONTACTO SUELO-ESTRUCTURA. . . . .	16
I.4.2. COMPORTAMIENTO DE LAS CIMENTACIONES. . . . .	17
I.4.2.1. Capacidad de carga en zapatas. . . . .	17
I.4.2.2. Asentamientos. . . . .	17
I.4.2.3. Pilotes. . . . .	18
I.4.2.4. Expansión por descarga. . . . .	18
I.4.2.5. Ademes. . . . .	19
I.5. DISEÑO DE ESTRUCTURAS. . . . .	19
I.6. DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS EN EL VALLE DE MÉXICO. . . . .	22
I.7. CONCLUSIONES. . . . .	24
<b>CAPÍTULO II. PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y LOS ESTUDIOS PATOLÓGICOS.</b> . . . . .	<b>25</b>
II.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	25
II.2. DEFINICIÓN DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y SUS ALCANCES. . . . .	26
II.2.1. SÍNTOMAS (ENFERMEDADES). . . . .	28
II.2.1.1. Daños, lesiones o enfermedades menores. . . . .	28
II.2.2. ORIGEN. . . . .	29
II.2.2.1. Causas o acciones de daño de enfermedades congénitas. . . . .	31
II.2.2.2. Causas o acciones de daño de enfermedades adquiridas. . . . .	32
II.2.3. MECANISMOS. . . . .	32
II.2.3.1. Acciones físicas. . . . .	34
II.2.3.2. Acciones mecánicas. . . . .	34
II.2.3.3. Acciones químicas. . . . .	34
II.2.3.4. Acciones biológicas. . . . .	34
II.2.4. CONSECUENCIAS. . . . .	34
II.2.5. TERAPIA. . . . .	36
II.3. DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL. . . . .	36
II.4. CICLO DE VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO. . . . .	38
II.4.1. VIDA ÚTIL DEL PROYECTO. . . . .	38



II.4.2. VIDA ÚTIL DE SERVICIO. . . . . 38  
II.4.3. VIDA ÚTIL ÚLTIMA O TOTAL. . . . . 39  
II.4.4. VIDA ÚTIL RESIDUAL. . . . . 40  
II.5. AGRESIVIDAD DEL MEDIO AMBIENTE. . . . . 40  
II.5.1. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DEL MEDIO AMBIENTE. . . . . 41  
II.6. CONCLUSIONES. . . . . 42

**CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. . . . . 43**

III.1. INTRODUCCIÓN. . . . . 43  
III.2. CONCRETO. . . . . 44  
III.2.1. CEMENTO. . . . . 45  
III.2.1.1. Composición química del cemento Portland. . . . . 46  
III.2.1.2. Cemento Portland ordinario. . . . . 47  
III.2.1.3. Cemento Portland de resistencia inicial alta. . . . . 48  
III.2.1.4. Cemento resistente a los sulfatos. . . . . 48  
III.2.1.5. Cemento Portland con escoria granulada de alto horno. . . . . 49  
III.2.1.6. Cemento Portland puzolanico. . . . . 49  
III.2.1.7. Cemento de baja reactividad álcali-agregado. . . . . 50  
III.2.1.8. Cemento blanco. . . . . 50  
III.2.1.9. Cemento con escoria granulada de alto horno. . . . . 51  
III.2.2. AGREGADOS. . . . . 51  
III.2.3. CALIDAD DEL AGUA. . . . . 52  
III.2.4. ADITIVOS. . . . . 53  
III.2.4.1. Cloruro de calcio. . . . . 53  
III.2.4.2. Aditivos retardantes. . . . . 54  
III.2.4.3. Aditivos reductores de agua. . . . . 54  
III.2.4.4. Aditivos impermeabilizantes. . . . . 54  
III.2.4.5. Aditivos inclusores de aire. . . . . 55  
III.3. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO. . . . . 55  
III.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO. . . . . 55  
III.3.1.1. Relación agua/cemento. . . . . 56  
III.3.1.2. Fatiga del concreto. . . . . 58  
III.3.1.3. Contracción por secado. . . . . 58  
III.3.1.4. Efectos térmicos en el concreto. . . . . 59  
III.3.2. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DEL CONCRETO. . . . . 60  
III.4. CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO. . . . . 61  
III.4.1. ACERO DE REFUERZO. . . . . 61  
III.4.2. RESISTENCIA DEL ACERO DE REFUERZO. . . . . 63  
III.5. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO. . . . . 64  
III.5.1. MATERIALES COMPONENTES DEL MORTERO. . . . . 65  
III.5.1.1. Cales. . . . . 66  
III.5.1.2. Cementos. . . . . 67  
III.5.1.3. Áridos. . . . . 67  
III.5.1.4. Aditivos. . . . . 68  
III.5.1.5. Adiciones. . . . . 70  
III.5.1.6. Agua. . . . . 70

III.5.2. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO FRESCO. . . . .	70
III.5.2.1. Consistencia. . . . .	70
III.5.2.2. Adherencia (en estado fresco). . . . .	71
III.5.2.3. Contenido de iones de cloruro. . . . .	71
III.5.2.4. Capacidad de retención de agua. . . . .	71
III.5.3. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO ENDURECIDO. . . . .	72
III.5.3.1. Resistencia mecánica. . . . .	72
III.5.3.2. Adherencia (estado endurecido). . . . .	72
III.5.3.3. Retracción. . . . .	73
III.5.3.4. Absorción de agua. . . . .	74
III.5.3.5. Densidad (estado endurecido). . . . .	74
III.5.3.6. Permeabilidad al vapor de agua. . . . .	74
III.5.3.7. Comportamiento térmico. . . . .	75
III.5.3.8. Comportamiento ante el fuego. . . . .	75
III.5.4. MORTEROS DE RESINAS. . . . .	76
III.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS TABIQUES, BLOQUES Y TABICÓN. . . . .	77
III.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN. . . . .	80
III.7.1. METALES FERROSOS. . . . .	81
III.7.1.1. Hierro. . . . .	82
III.7.1.2. Acero. . . . .	82
III.7.1.3. Fundición. . . . .	82
III.7.2. METALES NO FÉRRICOS. . . . .	83
III.7.2.1. Aluminio. . . . .	84
III.7.2.2. Cobre. . . . .	84
III.7.2.3. Bronce. . . . .	85
III.7.2.4. Latón. . . . .	85
III.7.2.5. Zinc. . . . .	85
III.7.2.6. Plomo. . . . .	85
III.7.2.7. Estaño. . . . .	85
III.8. PINTURAS. . . . .	86
III.8.1. LAS PINTURAS DE AGUA. . . . .	86
III.8.2. PINTURAS SINTÉTICAS. . . . .	86
III.9. CARACTERÍSTICAS DE LOS VIDRIOS. . . . .	88
III.9.1. VIDRIO OPACO. . . . .	90
III.9.2. VIDRIO COLOREADO. . . . .	90
III.9.3. VIDRIO SECURIZADO O VIDRIO TEMPLADO. . . . .	90
III.9.4. VIDRIOS AISLANTES. . . . .	90
III.10. CONCLUSIONES. . . . .	91
<b>CAPÍTULO IV. AGENTES Y MECANISMOS DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO. 93</b>	
IV.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	93
IV.2. ERRORES EN EL PROYECTO O EN LA EJECUCIÓN. . . . .	95
IV.2.1. FALLAS DURANTE LA CONCEPCIÓN Y DISEÑO DEL PROYECTO. . . . .	95
IV.2.1.1. Asentamientos del terreno. . . . .	96
IV.2.2. FALLAS POR MATERIALES. . . . .	98



---

IV.2.3. FALLAS POR CONSTRUCCIÓN. . . . .	100
IV.2.4. FALLAS POR OPERACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS. . . . .	101
IV.2.5. FALLAS POR FALTA DE MANTENIMIENTO. . . . .	101
IV.3. ACCIONES MECÁNICAS. . . . .	101
IV.3.1. EFECTO DE LAS CARGAS (FLUENCIA). . . . .	102
IV.3.2. SOBRECARGAS Y DEFORMACIONES IMPUESTAS. . . . .	103
IV.3.3. GRIETAS ESTRUCTURALES (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO). . . . .	103
IV.3.3.1. Grietas por tracción pura. . . . .	105
IV.3.3.2. Grietas por flexión. . . . .	105
IV.3.3.3. Grietas longitudinales. . . . .	106
IV.3.3.4. Grietas por cortante. . . . .	107
IV.3.3.5. Grietas por torsión. . . . .	108
IV.3.3.6. Grietas por punzonamiento. . . . .	108
IV.3.3.7. Grietas por compresión simple. . . . .	109
IV.3.4. FRACTURAS Y APLASTAMIENTOS. . . . .	113
IV.3.4.1. Grietas de apoyo. . . . .	113
IV.3.4.2. Fracturas por aplastamiento local. . . . .	115
IV.3.4.3. Fracturas por impacto. . . . .	115
IV.3.4.4. Desintegración por trituración. . . . .	115
IV.3.5. VIBRACIONES EXCESIVAS. . . . .	115
IV.3.6. DAÑOS POR ABRASIÓN. . . . .	116
IV.3.6.1. Desgaste por frotamiento. . . . .	116
IV.3.6.2. Desgaste por fricción. . . . .	116
IV.3.6.3. Erosión por materiales abrasivos. . . . .	116
IV.3.6.4. Erosión por cavitación. . . . .	116
IV.4. ACCIONES FÍSICAS. . . . .	117
IV.4.1. PLANOS DE FALLA Y FISURAS EN EL CONCRETO. . . . .	117
IV.4.2. CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO PLÁSTICO. . . . .	117
IV.4.2.1. Fisuras plásticas. . . . .	117
IV.4.2.2. Movimiento durante la construcción. . . . .	119
IV.4.2.3. Fisuras por heladas tempranas. . . . .	119
IV.4.3. CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO ENDURECIDO. . . . .	120
IV.4.3.1. Fisuras por cambios de humedad. . . . .	120
IV.4.3.2. Fisuras por cambios de temperatura. . . . .	121
IV.4.3.3. Ataque por fuego. . . . .	124
IV.4.3.4. Cambios de la masa endurecida. . . . .	126
IV.5. ACCIONES QUÍMICAS. . . . .	126
IV.5.1. ATAQUE DE ÁCIDOS. . . . .	127
IV.5.2. LIXIVIACIÓN POR AGUAS BLANDAS. . . . .	129
IV.5.3. CARBONATACIÓN. . . . .	129
IV.5.4. ATAQUE DE SULFATOS. . . . .	131
IV.5.4.1. Ataque de los sulfatos a morteros. . . . .	134
IV.5.5. EXPANSIÓN DESTRUCTIVAS DE LAS REACCIONES ÁLCALI-AGREGADO. . . . .	134
IV.5.5.1. Reacción Alkali-Sílice. . . . .	137
IV.5.5.2. Reacción Alkali-Silicato. . . . .	138
IV.5.5.3. Reacción Alkali-Carbonato. . . . .	138

---

IV.5.5.4. Cristalización de sales. . . . .	138
IV.5.6. ACCIÓN DE LOS CLORUROS EN EL CONCRETO. . . . .	139
IV.5.7. SUCIEDAD DE LAS FACHADAS. . . . .	141
IV.6. ACCIONES BIOLÓGICAS. . . . .	142
IV.6.1. CONCEPTO DE LA BIORREACTIVIDAD. . . . .	143
IV.6.1.1. Presencia de agua. . . . .	143
IV.6.1.2. Disponibilidad de nutrientes. . . . .	143
IV.6.1.3. Condiciones ambientales. . . . .	144
IV.6.1.4. Superficies de colonización. . . . .	144
IV.6.2. DEFINICIÓN DE BIOCAPA. . . . .	144
IV.6.2.1. Formación de la biocapa. . . . .	144
IV.6.3. MECANISMOS DE DETERIORO BIOLÓGICO. . . . .	145
IV.6.3.1. Biodegradación del concreto. . . . .	145
IV.6.3.2. Biodegradación de hidrocarburos. . . . .	145
IV.6.3.3. Biocorrosión de los metales. . . . .	146
IV.6.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS Y SU ACCIÓN SOBRE EL CONCRETO. . . . .	146
IV.6.4.1. Bacterias. . . . .	146
IV.6.4.2. Hongos. . . . .	147
IV.6.4.3. Algas, líquenes y musgos. . . . .	147
IV.7. FALLOS EN LOS ACABADOS. . . . .	148
IV.7.1. REVESTIMIENTOS DE LOS PARAMENTOS. . . . .	148
IV.7.1.1. Defectos más frecuentes. . . . .	149
IV.7.1.2. Fisuras por contracción. . . . .	149
IV.7.1.3. Fisuración progresiva. . . . .	150
IV.7.1.4. Friabilidad de la capa exterior del revestimiento. . . . .	150
IV.7.1.5. Desconchados. . . . .	150
IV.7.1.6. Progresión degenerativa de un desconchado. . . . .	151
IV.7.2. FALLAS EN LA PINTURA. . . . .	152
IV.7.2.1. Exfoliaciones. . . . .	152
IV.7.2.2. Defectos de adherencia. . . . .	153
IV.7.2.3. Ampollas. . . . .	154
IV.7.2.4. Manchas. . . . .	154
IV.7.2.5. Hendiduras. . . . .	155
IV.8. CONCLUSIONES. . . . .	155
<b>CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO. . . . .</b>	<b>157</b>
V.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	157
V.2. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR. . . . .	158
V.2.1. ANTECEDENTES. . . . .	159
V.2.2. REVISIÓN DEL PROYECTO ORIGINAL. . . . .	160
V.2.3. SELECCIÓN DE RECURSOS PARA LA INSPECCIÓN. . . . .	160
V.2.4. INSPECCIÓN VISUAL. . . . .	161
V.2.5. MEDICIONES. . . . .	162
V.2.6. AUSCULTACIÓN DE LA ESTRUCTURA. . . . .	162



---

V.2.7. EXPLORACIÓN DE LA ESTRUCTURA. . . . .	166
V.2.8. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS, ENSAYOS Y ANÁLISIS. . . . .	166
V.2.9. INFORME PRELIMINAR. . . . .	166
V.3. INVESTIGACIÓN PROFUNDA O DETALLADA. . . . .	167
V.3.1. DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO. . . . .	167
V.3.1.1. Información del diseño estructural. . . . .	167
V.3.1.2. Informe de materiales. . . . .	168
V.3.1.3. Información de la construcción. . . . .	168
V.3.1.4. Historial de servicio. . . . .	168
V.3.1.5. Registro de la información. . . . .	169
V.3.2. EXAMEN DE LA ESTRUCTURA. . . . .	169
V.3.3. PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN PARA EL EXAMEN. . . . .	169
V.3.3.1. Proceso científico. . . . .	169
V.3.3.2. Verificación de la estructura en campo. . . . .	170
V.3.3.3. Valoración de la condición actual. . . . .	170
V.3.3.4. Condiciones de seguridad y riesgo potencial. . . . .	171
V.3.3.5. Valoración de las lesiones. . . . .	171
V.3.3.6. Testigo para determinar movimientos de flexión. . . . .	173
V.3.4. ENSAYOS A LA ESTRUCTURA Y TOMAS DE MUESTRAS. . . . .	174
V.3.4.1. Localización y frecuencia. . . . .	174
V.3.4.2. Extracción de núcleos. . . . .	175
V.3.4.3. Extracción de muestras de polvo. . . . .	175
V.3.4.4. Extracción de probetas del acero de refuerzo. . . . .	175
V.3.5. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS. . . . .	175
V.3.5.1. Ensayos físicos. . . . .	175
V.3.5.2. Ensayos mecánicos. . . . .	175
V.3.5.3. Ensayos químicos. . . . .	175
V.3.5.4. Ensayos biológicos. . . . .	175
V.3.6. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL. . . . .	178
V.3.7. INFORME FINAL. . . . .	178
V.4. DISEÑO DETALLADO DE LA SOLUCIÓN. . . . .	179
V.5. CONCLUSIONES. . . . .	179
<b>CAPÍTULO VI. MATERIALES DE REPARACIÓN. . . . .</b>	<b>181</b>
VI.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	181
VI.2. ELECCIÓN DEL MATERIAL DE REPARACIÓN Y REFUERZO. . . . .	181
VI.3. EFECTOS POR CAMBIO DE VOLUMEN. . . . .	183
VI.4. MATERIALES DE BASE INORGÁNICA. . . . .	183
VI.4.1. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA. . . . .	183
VI.4.1.1. Morteros de retracción controlada y expansivos. . . . .	184
VI.4.1.2. Morteros de alta velocidad de fraguado. . . . .	185
VI.4.1.3. Morteros de alta resistencia inicial. . . . .	185
VI.4.2. CONCRETO INYECTADO. . . . .	186
VI.5. MATERIALES DE BASE ORGÁNICA. . . . .	186
VI.5.1. LAS RESINAS EPÓXICAS. . . . .	186

---

VI.5.2. RESINAS SINTÉTICAS. . . . .	187
VI.5.3. LOS POLIURETANOS. . . . .	187
VI.5.4. LOS POLIMETACRILATOS. . . . .	188
VI.5.5. RESINAS ACRÍLICAS. . . . .	188
VI.5.6. EMULSIONES DE POLÍMEROS. . . . .	189
VI.6. MATERIALES DE BASE MIXTA. . . . .	190
VI.6.1. RESINAS EPOXI. . . . .	190
VI.6.2. RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO. . . . .	192
VI.7. PRODUCTOS PARA LA SILICATACIÓN. . . . .	192
VI.7.1. METASILICATO DE SODIO O POTASIO. . . . .	192
VI.7.2. TETRAFLORURO DE SILICIO. . . . .	192
VI.7.3. FLUOR SILICATO DE MAGNESIO O DE ZINC. . . . .	193
VI.8. ACEITES. . . . .	193
VI.9. ALGUNAS SUSTANCIAS COMUNES QUE SON UTILIZADAS PARA LA LIMPIEZA O TRATAMIENTO PREVIO. . . . .	193
VI.10. CONCLUSIONES. . . . .	194

**CAPÍTULO VII. ALGUNAS TÉCNICAS PARA REPARACIÓN. . . . . 197**

VII.1. INTRODUCCIÓN. . . . .	197
VII.2. TRABAJOS DE SANEAMIENTO. . . . .	197
VII.2.1. PREPARACIÓN DEL SOPORTE DEL CONCRETO. . . . .	198
VII.2.2. MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO PREVIO. . . . .	198
VII.2.3. POSIBILIDADES DE SANEAMIENTO. . . . .	199
VII.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO. . . . .	199
VII.3.1. ESCARIFICACIÓN MANUAL. . . . .	200
VII.3.2. DISCO DE DESBASTE. . . . .	201
VII.3.3. ESCARIFICACIÓN MECÁNICA. . . . .	201
VII.3.4. DEMOLICIÓN. . . . .	202
VII.3.5. LIJADO MANUAL. . . . .	202
VII.3.6. LIJADO ELECTRÓNICO. . . . .	202
VII.3.7. CEPILLADO MANUAL. . . . .	203
VII.3.8. PISTOLA DE AGUJAS. . . . .	203
VII.3.9. CHORRO DE ARENA SECA O HÚMEDA. . . . .	203
VII.3.10. DISCO DE CORTE. . . . .	204
VII.3.11. QUEMA CONTROLADA. . . . .	205
VII.3.12. REMOCIÓN DE ACEITE Y GRASAS IMPREGNADAS. . . . .	205
VII.3.13. MÁQUINA DE DESBASTE SUPERFICIAL. . . . .	205
VII.4. LIMPIEZA DE SUPERFICIES. . . . .	206
VII.4.1. CHORRO CON AGUA FRÍA. . . . .	206
VII.4.2. CHORRO DE AGUA CALIENTE. . . . .	206
VII.4.3. VAPOR. . . . .	206
VII.4.4. LAVADO CON SOLUCIONES ÁCIDAS. . . . .	207
VII.4.5. LAVADO CON SOLUCIONES ALCALINAS. . . . .	207
VII.4.6. REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS SUPERFICIALES. . . . .	207
VII.4.7. CHORRO CON AIRE COMPRIMIDO. . . . .	207



---

VII.4.8. SOLVENTES VOLÁTILES. . . . .	207
VII.4.9. SATURACIÓN CON AGUA. . . . .	208
VII.4.10.ASPIRACIÓN AL VACÍO. . . . .	208
VII.5. AGENTES DE ADHERENCIA. . . . .	208
VII.6. REFUERZO MEDIANTE RECERCIDOS CON CONCRETO ARMADO. . . . .	209
VII.6.1. REFORZAMIENTO DE COLUMNAS. . . . .	209
VII.6.2. REFORZAMIENTO DE VIGAS. . . . .	210
VII.6.3. REFORZAMIENTO DE LOSAS. . . . .	212
VII.6.3.1. Corrección de una losa flexionada con una placa de acero adherida. . . . .	212
VII.7. RECALCE. . . . .	214
VII.7.1. APLASTAMIENTO DE UN CIMENTACIÓN. . . . .	215
VII.7.2. SISTEMAS PARA EL RECALCE DE CIMIENTOS. . . . .	216
VII.7.3. LA CEMENTACIÓN. . . . .	218
VII.7.4. ESTABILIDAD DEL TERRENO POR SILICATACIÓN. . . . .	218
VII.7.5. PILOTAJE. . . . .	219
VII.8. CONCRETO Y MORTERO LANZADO. . . . .	220
VII.9. AGREGADO PRECOLADO. . . . .	223
VII.10.CIMBRA Y BOMBA. . . . .	224
VII.10.1.CIMBRA. . . . .	225
VII.10.2.COLOCACIÓN. . . . .	225
VII.11.REPARACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO. . . . .	226
VII.12.REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS MEDIANTE ACERO. . . . .	226
VII.13.PREVENCIÓN AL ATAQUE DE SULFATOS. . . . .	227
VII.14.REALCALINIZACIÓN DEL CONCRETO. . . . .	228
VII.14.1. REMOCIÓN DE CLORUROS. . . . .	229
VII.14.2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN. . . . .	229
VII.14.3. PROTECCIÓN CATÓDICA. . . . .	230
VII.14.4.EFECTOS BENÉFICOS INDUCIDOS POR LA PROTECCIÓN CATÓDICA. . . . .	231
VII.14.5.CONTRIBUCIONES NEGATIVAS. . . . .	231
VII.14.6.IMPREGNACIÓN CON POLÍMEROS. . . . .	232
VII.15.ENCOLADO DE BANDAS DE ACERO CON RESINAS EPOXI. . . . .	232
VII.16.INYECCIÓN DE FISURAS. . . . .	233
VII.17.LESIONES MENORES. . . . .	234
VII.17.1.LIMPIEZA DE SUCIEDADES. . . . .	234
VII.17.1.1. Fases del lavado de un paramento sucio. . . . .	235
VII.17.1.2. Productos que dañan la piedra. . . . .	235
VII.17.2.REMOCIÓN DE MANCHAS. . . . .	235
VII.17.3.DISGREGACIÓN DE LA OBRA VISTA DE LADRILLO. . . . .	236
VII.17.3.1. Ataque de los sulfatos a los morteros. . . . .	237
VII.17.4.REPARACIÓN DE UN DESCONCHADO. . . . .	238
VII.17.5.PROTECCIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS POR MEDIO DE MALLADO. . . . .	238
VII.17.6.ACABADOS DE PINTURA. . . . .	239
VII.17.7.TRATAMIENTO DE LOS DEFECTOS EN LOS ACABADOS DE PINTURA. . . . .	240
VII.17.7.1. Preparación de la superficie a pintar. . . . .	240
VII.17.7.2. Lavado. . . . .	241
VII.17.7.3. Decapado. . . . .	241

---

VII.17.7.4. Enmasillado. . . . .	242
VII.17.7.5. Imprimación. . . . .	242
VII.17.7.6. Sellados. . . . .	243
VII.17.8. CONSOLIDACIÓN. . . . .	243
VII.17.9. PROCESO DE CONSERVACIÓN A BASE DE PINTURAS. . . . .	244
VII.17.9.1. Pinturas hidrofugantes. . . . .	244
VII.17.9.2. Pinturas impermeabilizantes. . . . .	245
VII.18. PREVENCIÓN. . . . .	247
VII.19. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO. . . . .	248
VII.20. MATERIALES Y SISTEMA DE REPARACIÓN, REFUERZO Y PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO. . . . .	249
VII.21. CONCLUSIONES. . . . .	250
 <b>CONCLUSIONES FINALES. . . . .</b>	 <b>253</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA. . . . .</b>	 <b>255</b>



## INTRODUCCIÓN

La **patología de la construcción** puede ser definida como la parte de la ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y las consecuencias de los defectos de las obras civiles.

Para conocer los alcances de la patología de la construcción, debemos entender que las construcciones al igual que los seres vivos, pueden sufrir enfermedades y lesiones, que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunas de ellas pueden ser congénitas, es decir, que estuvieron presentes desde su concepción y/o construcción; otras pueden haberse contraído durante alguna etapa de su vida útil; y otras pueden ser consecuencia de accidentes.

Entre la problemática que podemos mencionar se encuentran: Fisuras y grietas estructurales debidas a diferentes sollicitaciones mecánicas y físicas, degradación y descomposición de la masa de concreto debido a fenómenos físicos, químicos y biológicos, fallas debidas a un mal proyecto, mala ejecución o utilización de materiales inadecuados, y falta de mantenimiento y supervisión de la construcción y más específicamente de su estructura.

Esta tendencia gestada principalmente en Francia, Gran Bretaña y Alemania surge como consecuencia de la defensa del patrimonio arquitectónico, y ha alcanzado el estatus de ciencia.

Esta nueva ciencia, propone una serie de medidas de diseño constructivo, de selección de materiales, mantenimiento y uso, ante las diferentes sollicitaciones a que este sometida una estructura y sus diferentes elementos que integran la construcción, a partir de las cuales el ingeniero podrá decidir la más apropiada para anular el origen del proceso patológico.

Por tal motivo, como se verá a lo largo del presente trabajo, es necesario conocer y comprender el origen, el proceso, sus causas, su evolución, y los síntomas que presenta una construcción de concreto, para así de esta forma estar en la posibilidad de dar un diagnóstico y la solución ante diferentes sollicitaciones. Asimismo se propone un estudio sistemático para conocer el estado actual de la construcción, para así poder diagnósticas y pronosticar el comportamiento de la estructura ante diversas sollicitaciones e influencias.

En el capítulo I se establece los antecedentes que dieron origen a los suelos, la composición y la estratigrafía de la Ciudad de México, los cuales tienen una influencia directa sobre las fallas que puede presentar una construcción. Así mismo, se establece los efectos que tienen la sobreexplotación de los acuíferos de la Ciudad de México, y una descripción de capacidad de carga de los suelos y su influencia sobre las cimentaciones. Para finalizar este capítulo se da una descripción de los aspectos fundamentales del diseño estructural y los aspectos a tomar en cuenta durante un movimiento sísmico.

En el capítulo II se define la patología de la construcción y sus alcances, se da un primer acercamiento a los síntomas, origen, mecanismos, consecuencias y la terapia adecuada ante las enfermedades y lesiones que puede presentar una construcción. En este capítulo podrá encontrar una breve definición del origen de las enfermedades y lesiones de una construcción. Así mismo, se define la durabilidad y vida útil de una construcción de concreto, la agresividad del medio ambiente a que está expuesta y su clasificación.

En el capítulo III se define las características de los principales materiales empleados en las construcciones urbanas, entre las que podemos mencionar: el concreto; el acero; el mortero; los tabiques, bloques y tabicón; los metales, como por ejemplo, el aluminio, el cobre o el bronce; las pinturas; y los vidrios.



En el capítulo IV se definen los agentes y mecanismos de deterioro de las estructuras de concreto, entre las que podemos mencionar: errores en el proyecto o en la ejecución; las acciones mecánicas sobre las estructuras de concreto; las acciones físicas sobre las estructuras de concreto; las acciones químicas sobre las estructuras de concreto; las acciones biológicas sobre las estructuras de concreto; y los fallos en los acabados.

En el capítulo V se lleva a cabo una descripción de la evaluación de las estructuras de concreto, la cual tiene por objeto sistematizar y ordenar una serie de pasos secuenciales para llevar a cabo una investigación que permita elaborar un diagnóstico, de modo que este a su vez permita emitir un pronóstico de comportamiento de la estructura, bajo las condiciones de servicio esperadas. Esta evaluación permite llevar a cabo una investigación la cual puede ser preliminar o profunda.

En el capítulo VI se describe y clasifican los principales materiales de reparación. En este capítulo se da una explicación de la forma de llevar a cabo la elección de un material de reparación y refuerzo, los aspectos y características fundamentales a tomar en cuenta en la elección del material de reparación.

En el capítulo VII se menciona algunas de las principales técnicas de reparación, el procedimiento de ejecución y los aspectos a tomar en cuenta en la elección de una técnica de reparación. Aquí se mencionan, los trabajos de saneamiento, la preparación del sustrato, la limpieza de la superficie, los agentes de adherencia, los refuerzos mediante recrecidos, los recalces, el concreto y mortero lanzado, el agregado precolado, las técnicas de reparación mediante cimbra y bomba, la forma de llevar a cabo la reparación y sustitución del acero de refuerzo, entre otras.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

### I.1. INTRODUCCIÓN

Desde los albores de la historia, la erección de estructuras ha sido parte esencial del esfuerzo humano. Sin embargo, no fue sino hasta alrededor de la mitad del siglo XVII que los ingenieros empezaron a aplicar el conocimiento de la mecánica (las matemáticas y la ciencia) en el diseño de estructuras. Las primeras estructuras de ingeniería se diseñaron por tanteos y con la aplicación de reglas empíricas basadas en la experiencia pasada. Algunas de las magníficas estructuras de las eras antiguas, como las pirámides egipcias (alrededor del año 3000 a. C.), los templos griegos (500-200 a. C.), los coliseos y acueductos romanos (200 a. C.-200 d. C.) y las catedrales góticas (1000-1500 d.C.), todavía en pie, son en la actualidad testimonios del ingenio de sus constructores.

En general, Galileo Galilei (1564-1642) se considera como el iniciador de la teoría de las estructuras. Galileo analizó la falla de algunas estructuras simples, incluyendo las vigas en voladizo. Aun cuando las predicciones de Galileo de las resistencias de las vigas sólo fueron aproximadas, su trabajo puso el cimiento para los desarrollos futuros en la teoría de las estructuras.

Después del trabajo precursor del Galileo, el conocimiento de la mecánica estructural avanzó a paso rápido en la segunda mitad del siglo XVII y hacia XVIII. Entre los investigadores notables de ese período se encuentran Robert Hooke (1635-1703), quien desarrollo la Ley de las resistencias lineales entre la fuerza y la deformación de los materiales (ley de Hooke); Isaac Newton (1642-1727) quien desarrollo las leyes del movimiento y desarrolló el cálculo ; John Bernoulli (1667-1748), quien formulo el principio del trabajo virtual; Leonhard Euler (1707-1783), quien desarrollo la teoría del pandeo de columnas y C. A. de Coulomb (1736-1806), quien presentó el análisis de la flexión de las vigas elásticas.

En el momento en que el ritmo de la construcción aumento hasta niveles similares a los que hoy se conocen, el método de “arte” se convirtió en algo particularmente peligroso, al aumentar el número de constructores, con lo que, necesariamente, el arte de cimentar cayó en manos no siempre muy bien dotadas. Los fracasos que entonces se hicieron notar condujeron al primer intento de racionalizar la construcción de las cimentaciones. Los constructores de alguna determinada ciudad volvieron la vista a sus realizaciones bien logradas y, relacionando la carga soportada con el área del cimiento, trataron de establecer un valor “seguro” del esfuerzo que era posible dar al suelo de aquel lugar particular. Nacieron así las leyes de “Códigos” o “Reglamentos”, que en muchas partes perduran en la actualidad.

Sin embargo, basta pensar por un instante en las complejidades y variaciones del suelo en cualquier lugar del planeta, para darse cuenta que la generalización que se persigue en un código urbano de tal estilo es, por lo menor, muy peligroso. Además, hoy se dispone de una gran variedad de tipos de cimentación poco profunda, adaptable cada uno de ellas a tipos peculiares de suelos y estructuras, consiguiéndose con una buena combinación seguridad y economía máxima; es claro que los estudios de una técnica de tal naturaleza requerida, quedan muy lejos de la generalización burda que presupone un simple Código.



Con el conocimiento de las peculiaridades del proceso de formación y evolución de los suelos (estratigrafía) es lo que nos permite interpretar el comportamiento suelo-estructura. Entender la complejidad del subsuelo y los cambios que le está induciendo el hombre, es el antecedente necesario para analizar su comportamiento inmediato y futuro ante las solicitaciones que le imponen las estructuras. La conjunción y análisis de ese conocimiento en una metodología de trabajo que permita detectar lo que Terzaghi llamó “los pequeños detalles geológicos” es lo que nos permite predecir con cierta precisión el comportamiento del subsuelo.

Por lo anterior, se plantea que para realizar un estudio geotécnico de un sitio, es indispensable partir del conocimiento detallado de su estratigrafía, para racionalizar la obtención de las muestras alteradas e inalteradas, después para la programación de pruebas de laboratorio, definición de criterios de análisis de estabilidad y comportamiento y finalmente para la selección del proceso constructivo.

Desde luego el problema se atenúa en el Valle de México con el que se enfrentan los proyectistas de estructuras día a día, principalmente, el de los asentamientos que inducen las sobrecargas y su efecto en la estructura misma y en las estructuras vecinas (véase foto 1 y 2); sin embargo, el problema de la resistencia del subsuelo es también muy digno de consideración, dado que se refleja en un modo directo en la *Capacidad de carga* que es, claro está, otra cuestión de importancia.



Foto 1. Vivienda colindante afectado por una edificación de cinco niveles.



Foto 2. Agrietamiento y pérdida de horizontalidad

Es probablemente inútil insistir sobre el hecho ampliamente conocido de que las arcillas del Valle de México son altamente compresibles, al grado de que el problema de los asentamientos es el que principalmente debe preocupar a los ingenieros proyectistas de cimentaciones. Las arcillas están normalmente consolidadas en general; sin embargo, el intenso bombeo que últimamente se ha efectuado en los acuíferos del terreno ha aumentado las cargas de preconsolidación de los materiales sujetos a dicho fenómeno.

Otro problema que se enfrentan los proyectistas de estructuras y particularmente los proyectistas de cimentaciones es, el diseño de cimentaciones en la zona lacustre del Valle de México que presenta dificultades generalmente muy superiores a las que se encuentran en otras grandes áreas urbanas del mundo. Las cimentaciones superficiales de construcciones pesadas en esta zona pueden inducir asentamientos inaceptables y, en condiciones extremas, provocar la falla por cortante del subsuelo arcilloso. Recurrir a cimentaciones profundas tampoco garantiza en todos los

casos un buen comportamiento, debido al fenómeno de hundimiento regional que somete a los pilotes y pilas a fricción negativa y puede causar la emersión aparente de la construcción (véase figura I-1). Importantes esfuerzos de investigación y de desarrollo tecnológico han sido dedicados en las últimas décadas a lograr un mejor conocimiento del subsuelo y al desarrollo de soluciones de cimentación adaptadas a estas difíciles condiciones.

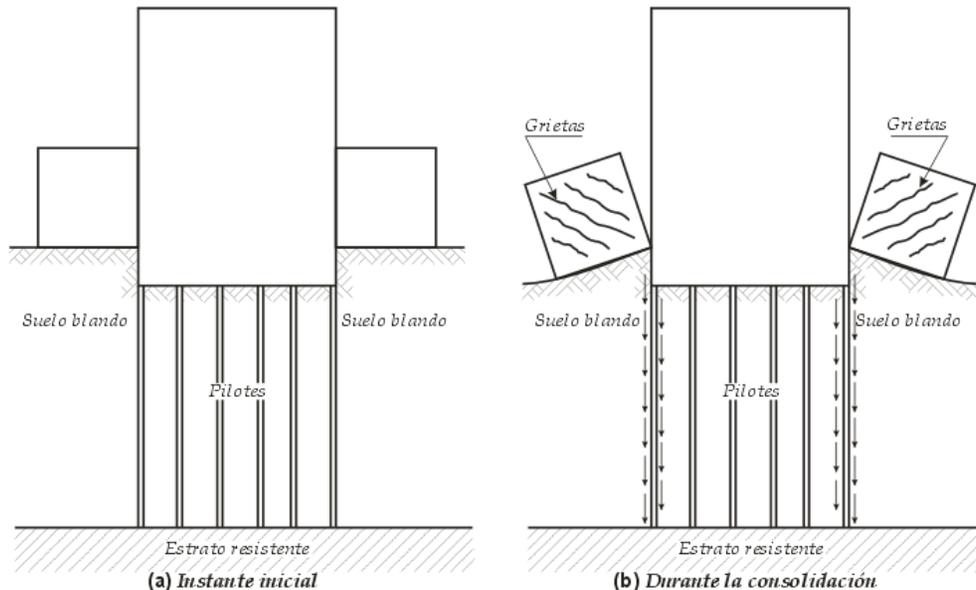


Figura I-1. Inducción de la fricción negativa a lo largo del fuste de pilotes de punta por consolidación de los estratos blandos.

Los sismos de 1985 pusieron en evidencia que, a las condiciones de diseño anteriores, que de por sí críticas, es imprescindible agregar las solicitaciones dinámicas originadas por este tipo de eventos. Los casos de grandes deformaciones y de falla del suelo que se presentaron, si bien correspondieron a un porcentaje bajo de las construcciones afectadas, fueron suficientes para que resultará evidente la necesidad de dar al diseño sísmico de las cimentaciones una importancia mucho mayor de la que se tenía en el pasado.

## I.2. ZONIFICACIÓN Y ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSUELO DEL VALLE DE MÉXICO

### I.2.1. SUELO

La palabra *Suelo* representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o se desintegren rápidamente por la acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo.

Los productos de los ataques de los agentes del intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual se derivan, dando así origen a suelos llamados *Residuales*. Pero esos productos pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que sobreyacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos suelos se les denomina *Transportados*.



Existen en la naturaleza numerosos agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales los glaciares, el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y la fuerza de gravedad; Estos factores actúan a menudo combinándose.

La combinación del escurrimiento de aguas en las laderas de colinas y montes y la fuerza del campo gravitacional, forman los depósitos de talud, en las faldas de las elevaciones; estos depósitos suelen ser heterogéneos, sueltos y predominantemente formados por materiales gruesos.

El escurrimiento de torrentes produce arrastre de materiales de gran tamaño (mayor a velocidades crecientes en el agua), que se depositan en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales más finos a las zonas planas de los valles.

Los ríos acarrear materiales de muy diversas graduaciones, depositándolos a lo largo de su perfil, según varíe la velocidad de su curso; al ir disminuyendo ésta, la capacidad de acarreo de la corriente se hace menor, depositándose los materiales más gruesos. De esta manera el río transporta y deposita suelos según sus tamaños decrecientes, correspondiendo las partículas más finas (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura.

Los depósitos lacustres son generalmente de grano muy fino, a causa de la pequeña velocidad con que las aguas fluyen en los lagos. Los depósitos marinos (formados por el mar) suelen ser estratificados, reflejando muchas veces las características de las costas que los mares bañen. Los depósitos glaciares están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.

Los vientos pueden arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde el del limo hasta el de las arenas gruesas; estos arrastres pueden hacer que las partículas se depositen a muchos kilómetros de su lugar de origen. Dos tipos principales de suelo deben su formación al arrastre del viento: el loess y médanos. El *Loess* puede definirse como un depósito eólico, constituido por una mezcla uniforme de arenas finas cuarzosas, algo feldespáticas y limos, estructurado de forma abierta y algo cohesiva.

Los *Médanos* son aglomeraciones de arena suelta, que fue arrastrada por el viento a poca altura y que se vio detenida por algún obstáculo natural de la superficie del terreno. Suelen estar formados por arenas cuarzosas uniformes, con algo de mica.

En lo que respecta a los suelos residuales, existen dos conceptos que juegan un papel muy importante. Son estos el perfil de meteorización y el conjunto de estructuras heredada. El primero es la consecuencia de materiales con diferentes propiedades, que se ha formado en el lugar donde se encuentra y que sobreyace a la roca no meteorizada. Se forma, tanto por ataque mecánico como por descomposición química, y puede variar considerablemente de un punto a otro, sobre todo por variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, topografía, condiciones de erosión, régimen de aguas subterráneas y clima.

#### **1.2.1.1. Minerales constitutivos de las arcillas**

Partiendo de los numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro y otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas. Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (absorción). En consecuencia, las arcillas caolínicas serán relativamente estables en presencia del agua.

Las montmorilonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por la naturaleza bipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentan fuertes tendencias a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico.

Las ilitas están estructuradas análogamente que las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansividad es menor que la de las montmorilonitas.

## **I.2.2. ESTRATIGRAFÍA DE LOS SUELOS LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

En el terciario superior existía un amplio Valle, en lo que hoy conocemos como la Cuenca del Valle de México, en el cual destaca la presencia de dos grandes ríos que lo surcaban de norte a sur, hacia los Valles de Cuernavaca y Cuautla. Al desarrollarse la Sierra del Chichinautzin durante el cuaternario superior, el valle se convirtió en una cuenca endorreica, con amplias superficies cubiertas por agua y acumuló en su fondo depósitos aluviales y lacustres intercalados con materiales volcánicos.

Los lagos en el fondo de la cuenca ocuparon una superficie del orden de 600 Km<sup>2</sup> y su extensión era determinada por las aportaciones pluviales, la infiltración y la evaporación.

La estratigrafía aceptada del valle es un lecho basal de origen calizo y depósitos marinos, a profundidades del orden de 2,000 m; sobreyace a ésta diversos depósitos de origen ígneo producto de una intensa actividad volcánica, a profundidades de 2,000 a 850 m. Esta formación constituye el contenedor inferior del acuífero. De 850 a 80 m de profundidad destacan formaciones arenosas de buena permeabilidad, intercaladas con mantos lacustres y piroclásticos, que corresponden al principal acuífero. La parte superior, de los 80 m a la superficie está compuesta por cenizas volcánicas hidratadas cuyas propiedades tienen una alta compresibilidad, baja resistencia y pobre estructuración que resultan desfavorables para la realización de obras de ingeniería.



Se puede generalizar que los suelos de la planicie lacustre del Valle de México se originaron durante el pleisteceno medio y superior y por supuesto en el holoceno, formándose una compleja secuencia de estratos blandos arcillosos, intercalados con capas y lentes duros. Los primeros son consecuencia de la depositación de partículas finas en lagos y los segundos de la acumulación de cenizas volcánicas o aluviones, así como la influencia de secado de suelos blandos expuestos al calor solar. En la figura I-2 se muestra la interpretación, que hace Mooser de ese proceso geológico.

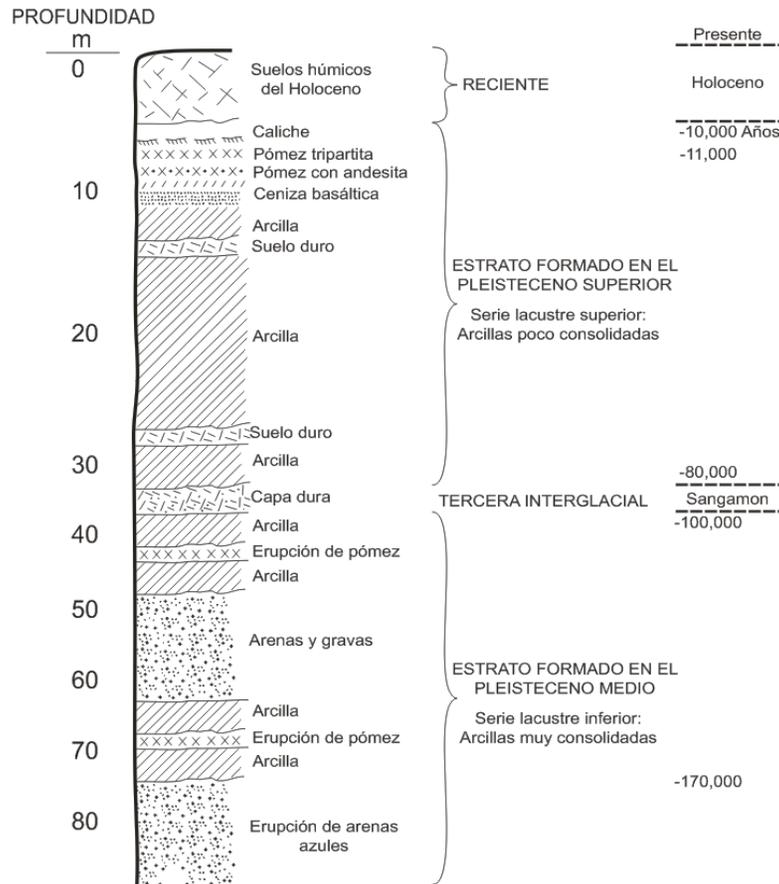


Figura I-2. Estratificación de la planicie lacustre de la Ciudad de México.

Los lentes duros intercalados entre los suelos blandos de la serie arcillosa superior tienen un espesor de 0.20 m hasta 2.0 m, con resistencia a la penetración muy variables.

Una característica peculiar de la capa dura es su variación en espesor y resistencia, que aparentemente aumenta en forma gradual del oriente al poniente, debido a que al conservar el antiguo lago un tirante mínimo, debilitó la formación de esta capa dura. Adicionalmente, la erosión de cauces superiores adelgazó el espesor de la capa dura, provocando también erraticidades locales. La capa dura desempeña un papel importante en las cimentaciones profundas de la Ciudad de México, ya que para muchas estructuras sirve como apoyo de sus pilotes, ya sean de punta de control o de punta penetrante.

### I.2.3. ZONIFICACIÓN DEL SUBSUELOS DEL VALLE DE MÉXICO

En 1952 fue posible elaborar la zonificación del área urbanizada en la Ciudad de México (véase figura I-3) atendiendo a las características más significativas del subsuelo. Actualmente denominadas zonas I, II y III en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

La primera de las áreas mencionadas corresponde a la **zona I**, llamada inicialmente de las **Lomas** por desarrollarse en parte en las últimas estribaciones de la Sierra de las Cruces y está constituida por terrenos compactos, areno-limosos, con alto contenido de grava algunas veces y tobas pumíticas bien cementadas otras; por algunas partes esta zona invade los derrames basálticos del Pedregal.

En general, la zona de las *Lomas* presenta buenas condiciones para cimentación de estructuras; la capacidad del terreno es alta y no hay formaciones compresibles capaces de asentarse mucho. Sin embargo, debido a la explotación de minas de arena y grava, muchos predios pueden estar cruzados por galerías de desarrollo muy errático. Muchas de estas galerías pueden estar actualmente rellenas de material arenoso suelto, lo cual, sin disminuir en mucho la peligrosidad, hace muy difícil la localización. Cuando las zapatas de cimentación quedan asentadas en estas zonas falsas se producen asentamientos diferenciales fuertes entre columnas, lo cual ha sido fuente de problemas en estas áreas.

Análogamente, en la zona del Pedregal en la que aparece una fuerte costra de derrames basálticos, en contacto entre los diferentes derrames pueden aparecer cuevas o aglomeraciones de material suelto y fragmentos que pueden ser causa de fallas bajo columnas pesadas. Esta es la razón citada por Marsal y Mazari para explicar porque las estructuras pesadas de la Ciudad Universitaria se erigieron evitando las áreas invadidas por las lavas derramadas antaño por el volcán Xitli. De otra manera, los costos de inyección de cemento para estabilización del suelo pueden resultar altos.

Otro problema que se presenta en la parte norte de la ciudad de México, dentro de la zona general de las **Lomas** es la presencia de depósitos eólicos de arena fina y uniforme; estas formaciones son susceptibles de presentar asentamientos diferenciales bruscos y erráticos y exigen estudios importantes para elegir el tipo de cimentación más conveniente o el método más eficaz de compactación artificial.

Entre las serranías del poniente y el fondo del *Lago de Texcoco* se presenta una **Zona II** también llamada de **Transición** (véase figura I-3), en donde las condiciones del subsuelo desde el punto de vista estratigráfico varían mucho de un punto a otro de la zona urbanizada.

En general aparecen depósitos superficiales arcillosos y limosos, orgánicos, cubriendo arcillas volcánicas muy compresibles que se presentan en espesores muy variables, con intercalación de arena limosa o limpias, compactas: todo el conjunto sobreyace sobre mantos potentes, predominantemente de arena y grava.

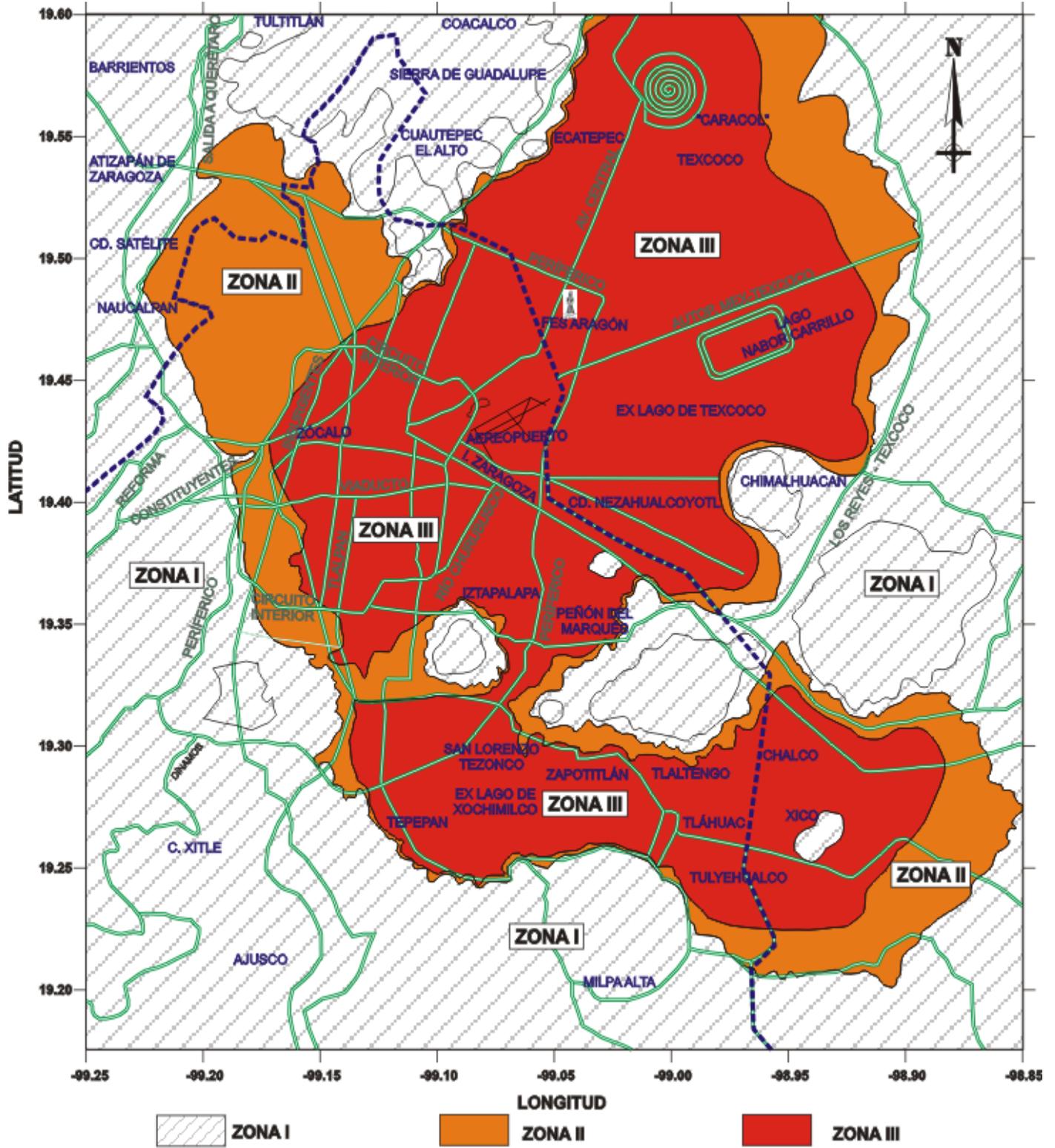


Figura I-3. Zonificación geotécnica de la ciudad de México.

Los problemas de capacidad de carga y asentamiento diferenciales pueden ser muy críticos, sobre todo en construcciones extensas sujetas a condiciones de cargas dispares; esto es frecuente en construcciones industriales, por otra parte muy frecuentes en esta zona. Como consecuencia, el ingeniero ha de investigar muy cuidadosamente todo el conjunto de propiedades de los materiales que constituyen el subsuelo de la obra de que se trate. Como ejemplo de las consecuencias que pueden derivarse de la ignorancia de este punto fundamental, Marsal y Mazari citan el caso, por cierto muy reiterado, de un edificio cimentado sobre pilotes de punta calculados con fórmulas dinámicas, de tanto uso desdichadamente en el pasado. Al ser hincados hasta el rechazo, los pilotes quedaron apoyados a profundidades muy diferentes, de acuerdo con la erraticidad con que aparecieron lentes de arena resistente. Al cabo de muy corto tiempo la estructura sufrió daños muy severos emanados del hecho de que los lentes de arena estaban contenidos en una matriz general arcillosa compresibles y, por estar los lentes a muy diferentes niveles, los espesores de arcillas bajo los pilotes resultaron también muy distintos, siendo, por lo tanto, sus asentamientos totales diferentes.

Además de la anterior zona de transición existe en la Ciudad de México la **Zona III** antes denominada zona del **Lago**, así llamada por corresponder a los terrenos que constituyeron el antiguo lago de Texcoco y está conformado por depósitos lacustres blandos y compresibles hasta profundidades de 50 a 60 m. Un corte estratigráfico típico de esta zona exhibe los siguientes estratos.

- a) Depósitos areno-arcillosos o limosos o bien artificiales de hasta 10 metros de espesor.
- b) Arcillas de origen volcánico, altamente compresibles, con intercalaciones de arena en pequeñas capas o en lentes.
- c) La primera capa dura, de unos 3 metros de espesor, constituida por materiales arcillo-arenosos o limo-arcilloso muy compactos. Esta capa suele localizarse a una profundidad del orden de 33 metros.
- d) Arcillas volcánicas de características semejantes a la b), aunque de estructura muy cerrada. El espesor de este manto oscila entre 4 y 14 metros.
- e) Estratos alterados de arena con grava y limo o arcilla arenosa.

En algunos lugares, a partir de los 65 metros, se ha encontrado un tercer manto arcilloso compresible.

Es claro que en la zona urbanizada pueden encontrarse variaciones importantes respecto a la anterior secuencia estratigráfica.

### I.3. EFECTOS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO

El crecimiento de la población es casusa de transformaciones importantes en la ciudad, pues se tiende a un desarrollo en altura con preferencia al horizontal; empieza a ser notoria la insuficiencia de abastecimiento de agua potable, y se recurre a la explotación de los acuíferos del subsuelo dentro del área urbana.



La explotación de agua subterránea en el Valle de México ha provocado hundimientos en el piso del valle. La sobreexplotación es de 25 m<sup>3</sup>/seg, muy superior a la recarga. Los hundimientos han afectado edificios, instalaciones industriales y en general a la infraestructura vial e hidráulica; han producido deformaciones y grietas en el terreno aluvial y lacustre, incrementando riesgos y vulnerabilidad a sismos e inundaciones.

La mayor parte del agua que se usa en el Valle de México proviene de acuíferos del mismo valle; el resto viene de acuíferos del Valle de Lerma, así como de fuentes más lejanas. Actualmente se requieren 61.4 m<sup>3</sup>/seg de agua (véase tabla 1); si no se toman medidas para eficientar su uso se requerirán en los próximos años, un poco más de 80 m<sup>3</sup>/seg.:

Fuente de abastecimiento	Gasto(m <sup>3</sup> /seg)
Pozos en la Cuenca de México	42.0
Pozos en el Valle de Lerma	5.9
Agua superficial Cuenca Cutzamala	13.5
<b>Total</b>	<b>61.4</b>

Tabla 1. Fuentes de abastecimiento de agua potable para Ciudad de México

Se ha estimado que la recarga del acuífero asciende a 25 m<sup>3</sup>/seg por agua pluvial. A la vez, se desconoce el efecto de las fugas en las redes de agua potable y alcantarillado sobre la recarga del acuífero y el de la infiltración directa de aguas residuales. Por lo tanto la sobreexplotación del acuífero de la Cuenca de México es igual o mayor a 25 m<sup>3</sup>/s.

Con base en las mediciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, el hundimiento de la ciudad no ha sido parejo y depende de qué zona de la capital se trate por ejemplo, el Oriente: Iztapalapa y Ciudad Nezahualcóyotl, en el Estado de México, reporta 37 centímetros por año; Noreste: Río de los Remedios se estima en 26 centímetros por año; Sureste: Tláhuac, Chalco y Xochimilco con 8.5 centímetros por año.

### I.3.1. HUNDIMIENTO GENERAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Las primeras advertencias serias sobre el hundimiento general del Valle de México fueron hechas por *Roberto Gayol* alrededor de 1925, el cual atribuía este fenómeno al abatimiento del nivel freático provocado por la red de colectores que no garantizaban una buena impermeabilización, construidos a principios del siglo XIX para drenar aguas servidas y de lluvia.

Al incrementar el bombeo paralelamente al crecimiento demográfico se observó en edificios y obras municipales manifestaciones de asentamientos diferenciales, las cuales se asentaron notoriamente en la década de 1940.

Este aspecto del problema se inició en 1847, cuando se empezó con la apertura de pozos hasta 105 m de profundidad; 1857 se habían abierto 168 pozos que mostraban artesianismo, los cuales producían en promedio 1.5 lt/seg/pozo. Posteriormente se intensificó la perforación de pozos, se agoto el artesianismo, se requirió el bombeo y se inició el dramático problema del hundimiento regional, originado por la pérdida de presión piezométrica del agua intersticial.

Hoy, el bombeo producido con fines de abastecimiento de aguas para la zona urbana han producido abatimiento de los niveles piezométricos en algunos casos superiores a los 20 metros. Este abatimiento de presión en los acuíferos provoca flujo de agua hacia los mantos arcillosos, con la correspondiente consolidación de las arcillas, acompañada de pérdida de volumen.

Los estudios de mecánica de suelos, las mediciones piezométricas y las nivelaciones del terreno en gran parte de la ciudad, permitieron constatar que la principal causa del hundimiento era la pérdida de presión en los acuíferos del subsuelo.

Si se toma como configuración inicial la que presentó Gayol de la Ciudad de México, correspondiente a los últimos años del siglo pasado, el hundimiento general ha sido del orden de 5 metros en la Catedral, de 6 metros en la calle de Tacuba y en la Alameda Central y de 7 metros en la zona en que confluye las avenidas de Juárez y Reforma (véase figura I-4). En la actualidad el hundimiento ocurre como una función lineal del tiempo, pero es muy variable de unos a otros puntos de la Ciudad, por lo que es difícil hablar de una cifra representativa del hundimiento anual, que oscila entre tanto de 5 a 25 cm/año, y aún más. Los estratos arcillosos que se encuentran a profundidades menores que 50 metros son los principales responsables del fenómeno, particularmente los comprendidos entre los 20 y los 50 metros de profundidad.

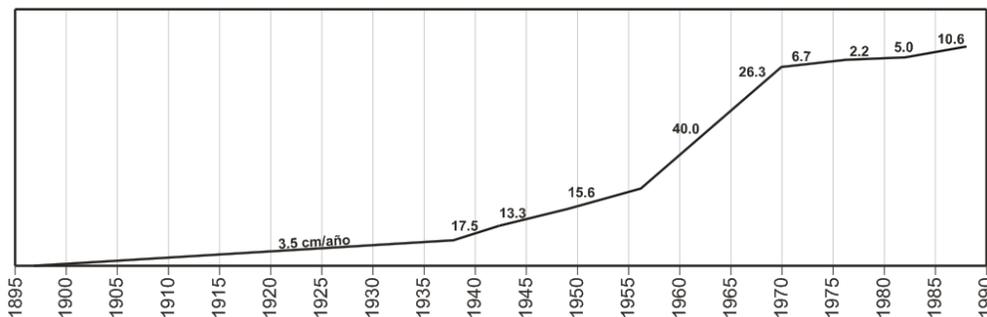


Figura I-4. Asentamiento regional en el centro de la Ciudad.

Apoiado en la información histórica y las nivelaciones efectuadas en la década de 1940, Nabor Carrillo infiere que la causa principal del hundimiento es el abatimiento de la presión hidráulica en los acuíferos del subsuelo, ocasionado por el bombeo dentro de la zona urbana; y con la teoría de la Consolidación propuesta por Terzaghi, pudo predecir las modalidades del fenómeno.

#### I.4. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA CAPACIDAD DE CARGA DE SUELOS

Las *Teoría de Capacidad de Carga*, desarrolladas a partir de 1920, proporcionaron una base más o menos científica al estudio de las cimentaciones. Combinadas con el creciente conocimiento de los suelos y sus propiedades mecánicas y con el mejoramiento de las técnicas de medición de campo, han permitido en la actualidad el desarrollo de una metodología de proyecto y construcción de cimentaciones mucho más racional y avanzada que la que nunca antes poseyó el ingeniero.

Para visualizar objetivamente el problema de la *Capacidad de carga* en suelos resulta útil el análisis del modelo mecánico que se presenta a continuación, debido a Khristianovich. Considérese una balanza ordinaria, cuyo desplazamiento está restringido por fricción en las guías de los platillos, tal como se muestra en la figura I-5.

Si un peso suficientemente pequeño se coloca en un platillo, la balanza permanece en equilibrio, pues la fricción en las guías puede neutralizarlo; en cambio, si el peso colocado es mayor que la capacidad de las guías para desarrollar fricción, se requerirá para el equilibrio, un peso suplementario en el otro platillo. Se entenderá por equilibrio crítico de la balanza, la situación en que esta pierde su equilibrio con cualquier incremento de peso en uno de los platillos, por pequeño que éste sea. Una balanza muy ligera, en comparación con los pesos manejados, representará un medio sin peso propio; una balanza relativamente pesada con respecto a los pesos de los platillos representará un medio también pesado.

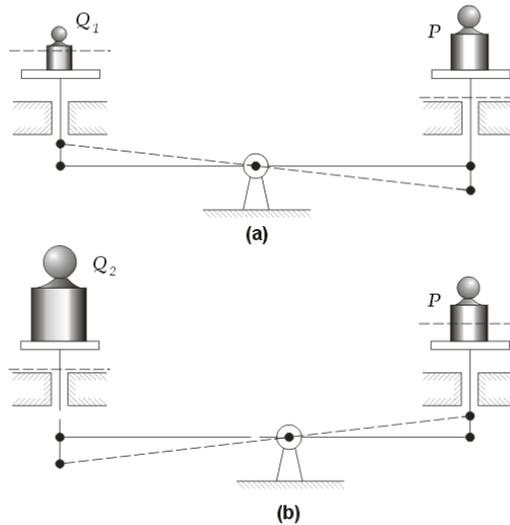


Figura I-5. Modelo de Khristianovich.

La estabilidad de cimentaciones puede ilustrarse con el siguiente problema planteado en la balanza. En el platillo derecho existe  $P$  y se requiere conocer  $Q$ , que debe colocarse en el platillo izquierdo, para tener la balanza en equilibrio crítico. Es evidente que este problema tiene dos soluciones; una correspondiente a un  $Q < P$  y la otra, por lo contrario, a un  $Q > P$ . Las alternativas de equilibrio en estos dos casos ocurren con movimientos diferentes, ilustrados en los casos (a) y (b) de la figura I-5.

Considérese ahora el caso de una cimentación. Un cimiento de ancho  $B$ , está desplantado a una profundidad  $D$ , dentro de un medio continuo (véase figura I-6).

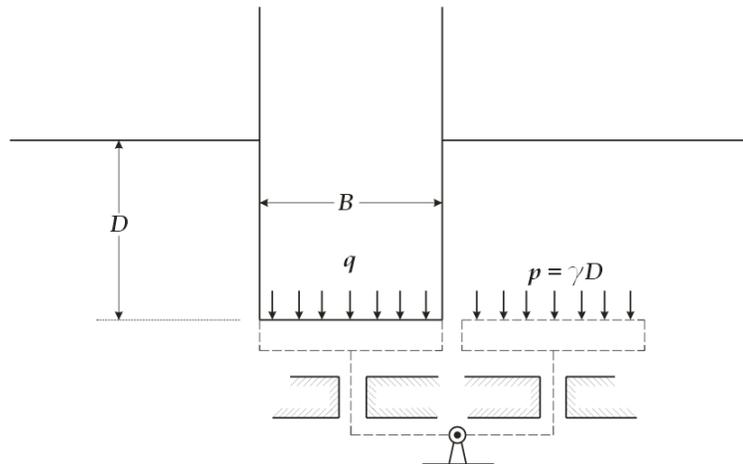


Figura I-6. Correspondencia de un cimiento con la balanza de Khristianovich.

El problema de una cimentación sería encontrar la carga  $q$ , máxima, que puede ponerse en el cimiento, sin que se pierda la estabilidad del conjunto. La correspondencia con la balanza puede visualizarse, haciendo coincidir un platillo con el cimiento, tal como se ve en la figura I-6. El otro platillo está dentro del terreno natural. Es evidente que la presión  $q$  que puede ponerse en el platillo izquierdo es mayor que la carga del otro platillo,  $p = \gamma D$ , puesto que la resistencia del suelo, representada en el modelo por la fricción en las guías está trabajando a favor del  $q$ . Este caso corresponde al de la figura I-5 (b), en que  $Q > P$ .

En el caso (b) de la figura I-5, en que  $Q < P$ , corresponde al de una excavación. Ahora  $q$  es nulo, pero conforme se profundiza la excavación las cosas suceden como si se bajase el nivel de la balanza de la figura I-5, con la consecuencia del aumento de la presión  $p$ . Es evidente que existirá una profundidad crítica tal que, al tratar de aumentar la excavación, el fondo de ésta se levantará como el platillo de la balanza lo haría. Este es un fenómeno de falla de fondo, frecuentemente reportado en las obras reales.

Un suelo muy resistente equivale a unas guías con mucha fricción. Los casos límite estarían representados por una roca sana, en la cual, con referencia al caso de la cimentación,  $q$  podría ser muy grande en comparación de  $p$  y por un líquido, de resistencia nula al esfuerzo cortante, en el que el máximo  $q$  que puede poderse es igual a  $p$  (principio de flotación). Una cimentación en la  $q$  sea igual a  $p$  se denomina en Mecánica de suelos totalmente compensada.

Tras visualizar objetivamente el problema que plantea una cimentación, la metodología de las dos disciplinas de la Mecánica del Medio Continuo que se han usada hasta hoy para resolver teóricamente el problema; estas dos disciplinas son las Teorías de la Elasticidad y de la Plasticidad.

- **Metodología de la Teoría de la elasticidad.** En esta teoría se encuentran los esfuerzos que en un cierto sistema de cargas exteriores produce en los puntos de la masa de suelo; en segundo lugar se encuentra la resistencia del suelo a ese tipo de esfuerzos. Una comparación entre ambos conceptos indicará si la masa de suelo puede resistir sin que se produzca la falla u ocurran deformaciones excesivas que pongan en peligro la función estructural.
- **Análisis basado en la Teoría de la plasticidad.** Esta teoría está fundado, como ya se dijo, en la Teoría de Plasticidad. Se considera comúnmente que un material tiene un comportamiento plástico cuando se comporta elásticamente hasta un cierto nivel de esfuerzos, a partir del cual (comportamiento plástico propiamente dicho), sigue las leyes de la figura I-7 (a) (comportamiento ideal plástico), o las de la figura I-7 (b) (comportamiento plástico, con endurecimiento por deformación). Hasta llegar al nivel de esfuerzos correspondiente al del comportamiento plástico, suele considerarse en la literatura de que el material puede tener o no deformación elástica; en el primer caso se tiene un comportamiento elasto-plástico; en el segundo, rígido-plástico; en este último caso el comportamiento plástico también puede ser perfecto o con endurecimiento por deformación (véase figuras I-7 (c) y (d)).

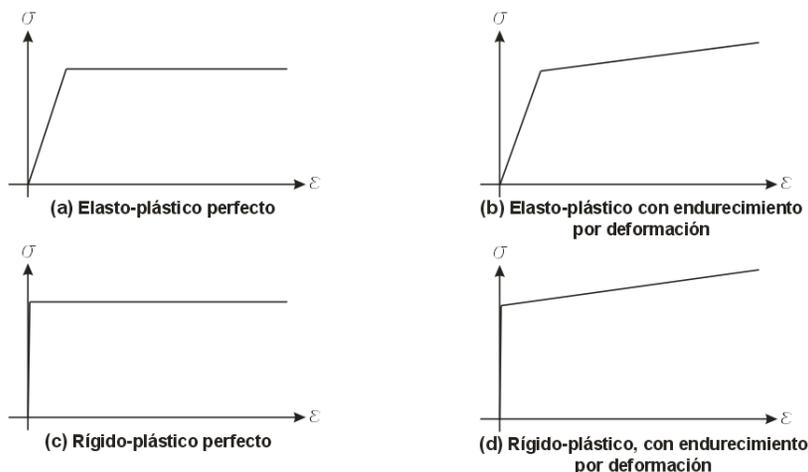


Figura I-7. Comportamientos plásticos.

### I.4.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL CONTACTO SUELO-ESTRUCTURA

Considérese en primer lugar el caso de un área uniformemente cargada y totalmente flexible. Debido a su flexibilidad, las presiones que el área cargada pasa al suelo serán idénticas a la presión uniforme sobre el área. Por otra parte, el asentamiento no será uniforme, sino que es máximo en el centro del área cargada y menor en la periferia, adoptando una ley similar a la que se muestra en la figura I-8 (a), si es que el medio cargado se supone idealmente elástico.

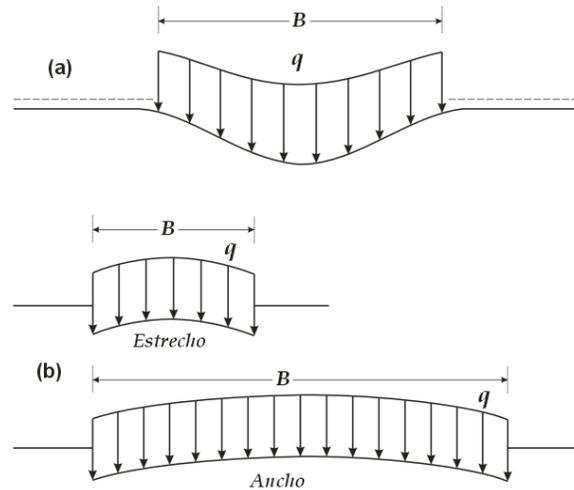


Figura I-8. Perfil de asentamiento bajo un área uniformemente cargada sobre la superficie de un medio semi-infinito.

En la práctica el asentamiento inmediato, debido exclusivamente a cambio de forma (es decir, excluyendo el asentamiento por consolidación), de áreas flexibles con carga uniforme, apoyadas en arcillas saturadas, adopta un perfil similar al mostrado en la parte (a) de la figura I-8. En cambio, cuando el área flexible se apoya en arenas o gravas, el perfil se parece al mostrado en la parte (b) de la misma figura, ya que estos materiales poseen la propiedad de que su rigidez aumenta con el confinamiento, el cual obviamente será máximo en la zona bajo el centro del área cargada.

Considérese ahora que la carga se transmite al suelo a través de una placa infinitamente rígida. En este caso, es obvio que, por su rigidez, la placa se asentará uniformemente, por lo que la presión de contacto entre placa y medio no podrá ser uniforme. Comparando este caso con el de la figura I-8, es fácil ver que en el medio homogéneo y elástico la presión es mínima al centro y máxima en las orillas, puesto que para llegar al asentamiento uniforme, éste deberá disminuir en el centro (disminución de presión) y aumentar en las arcillas (aumento de presión). Una intuición análoga para el caso del medio cuya rigidez aumenta con el confinamiento conduce a una distribución en la que la presión es máxima bajo el centro del área cargada y mucho menor bajo la periferia. En la figura I-9 se muestran ambas distribuciones (partes (a) y (b)).

También ahora, en la práctica, el caso (a) se parece a la distribución de una arcilla saturada, aún cuando teóricamente la presión es infinita en la periferia de la placa y es igual a la mitad de la presión media, bajo el centro; evidentemente la primera condición no puede satisfacerse y el valor de la presión en la periferia está limitado a su máximo que depende de la resistencia del material.

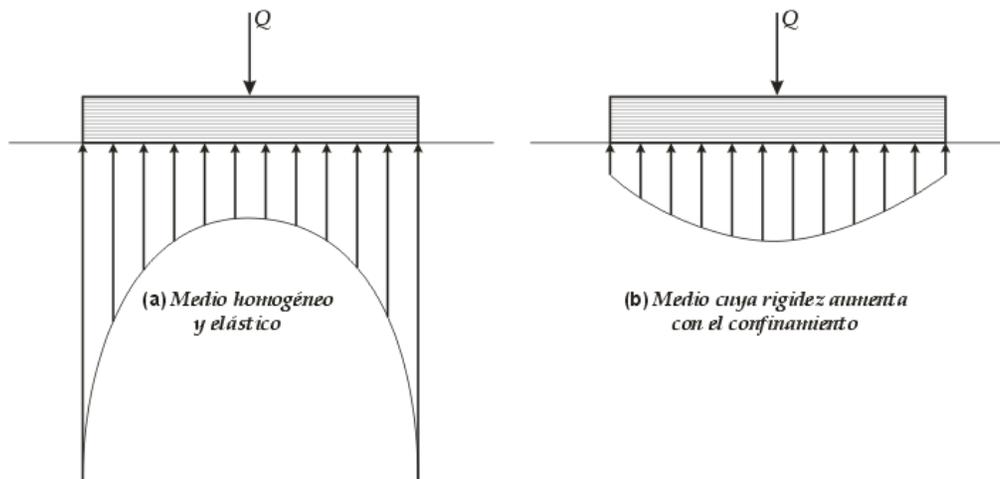


Figura I-9. Distribución de presiones bajo una placa infinitamente rígida.

En el caso (b) de la figura I-9 representa aproximadamente la distribución real de presión bajo una placa rígida colocada sobre arena o grava.

## I.4.2. COMPORTAMIENTO DE LAS CIMENTACIONES

### I.4.2.1. Capacidad de carga en zapatas

Las fórmulas de Terzaghi para determinar la capacidad de carga en zapatas se han aplicado satisfactoriamente en el caso de la Ciudad de México; en los terrenos arenosos de la zona de las *Lomas* se ha usado un factor de seguridad hasta de 6, pero sobre todo para limitar los asentamientos diferenciales. En la zona de *Transición* y del *Lago* se ha trabajado con factores de seguridad comprendidos entre 3 y 6; en este caso los asentamientos se han controlado con excavaciones que produzcan compensación parcial, pues en caso contrario y aún en casas de uno o dos pisos, alcanzan valores tan altos que hacen peligrar la estabilidad de las construcciones más someras.

Por otra parte, la hipótesis de distribución uniforme de las presiones bajo las zapatas parece razonable, de acuerdo con las mediciones efectuadas.

### I.4.2.2. Asentamientos

La predicción de las zonas de baja compresibilidad de la Ciudad de México (zonas de *Lomas*, *Pedregal*, etc.) no es fácil, pues el problema de cálculo de asentamientos en depósitos de arenas más o menos sueltas no está resuelto. En la zona del *Lago*, los asentamientos pueden predecirse con bastante buena aproximación, siempre y cuando se disponga de nueva información sobre las propiedades del subsuelo. La aplicación de la Teoría de Boussinesq se considera aceptable y la Teoría de la Compresibilidad de Terzaghi es el arma que se ha usado casi universalmente para los fines de que se habla.

La predicción de la evolución de los asentamientos con el tiempo es mucho más difícil e insegura, pues por un lado se duda que las pruebas de consolidación den un coeficiente de consolidación apropiado a la realidad y, por otra parte, la existencia de pequeñísimas capas y lentes de arena cuya intercomunicación no se conoce y cuyo efecto como drenes no se puede por lo tanto, estimar apropiadamente.



En general ha dado muy malos resultados siempre el permitir que se desarrollen en las estructuras los grandes asentamientos que pueden llegar a presentarse en la arcilla del Valle de México, si no se toman precauciones específicas contra ellos; un límite de asentamiento que se tomado como razonables es de 15 cm en total, diseñando las cimentaciones de modo que este valor no se sobrepase.

#### **1.4.2.3. Pilotes**

El hundimiento general provoca fenómenos de fricción negativa en las cimentaciones piloteadas; al respecto se va poseyendo bastante información inferida de las ya numerosas pruebas de extracción de pilotes llevadas a cabo. La carga necesaria para remover el pilote aumenta con el tiempo, pasando por un máximo a la 300 horas de hincado; a partir de ese momento disminuye ligeramente; en cambio la resistencia a la compresión simple de los materiales alrededor de los pilotes crece monótonamente con el tiempo, tendiendo a un valor límite. En el valor de la resistencia a la extracción influyen fundamentalmente la velocidad de desplazamiento el pilote durante la prueba, el material de que está constituido el mismo y la forma como se realice el hincado. En la Ciudad de México, si el hundimiento ocurre al ritmo actual y con pilotes de concreto hincados al golpe, la fricción lateral está comprendida entre 1.0 y 1.5 ton/m<sup>2</sup> siendo muy poco probable los valores mayores.

Al clavar pilotes en la zona del Lago, la resistencia a la penetración es pequeña en los primeros 10 m y se incrementa lentamente con la profundidad hasta alcanzar la primera capa dura. Este manto es de mucha mayor resistencia y en él pueden apoyarse pilotes que trabajen por punta. Cuando el espaciamiento entre los pilotes es menor que 2 metros y el número de estos no es muy pequeño, el terreno en el que se efectúa el hincado se levanta, abarcando este fenómeno zonas que quedan fuera del área pilotada. Comprobaciones teóricas y experimentales parecen indicar que cuando los pilotes están espaciados a menos de 1 m, la arcilla entre ellos deba alcanzar un comportamiento plástico, tras pasar por un estado de falla. En general, cabe distinguir tres zonas alrededor de un pilote: a) la parte adyacente, de material alterado por completo; b) la región en que los esfuerzos de hincado producen un estado de falla y la arcilla trabaja plásticamente; y c) la zona exterior en estado elástico. En la zona de alteración se tiene resistencias a la compresión simple superiores a la obtenida para especímenes remoldeados en el laboratorio; para la región plástica, la resistencia es mayor, del orden de la mitad de la del suelo inalterado.

Las pruebas de carga efectuadas en la zona del Lago parecen indicar que la Teoría de Meyerhof da resultados de relativa consistencia, que permiten fijar un criterio de capacidad de carga adecuado en los pilotes de punta hincados al golpe; esta conclusión parece confirmarse en la zona de transición. El uso de criterios de rechazo y de fórmulas dinámicas ha sido causa de graves problemas en las cimentaciones de la Ciudad de México, produciendo asentamientos diferenciales excesivos con muchas frecuencia y capacidades de carga de proyecto muy desviadas de la realidad.

#### **1.4.2.4. Expansión por descarga**

En un principio se juzgo que el proceso de la expansión del fondo de una excavación era idéntico al de consolidación aunque, ocurriese, por así decirlo, en sentido contrario. El agrietamiento del fondo y el de los taludes de la excavación, así como de los asentamientos observados en edificios totalmente compensados

demonstraron, sin embargo, que existen diferencias de importancia entre ambos procesos, razón por la que resultó necesario realizar medidas y estudios específicos para el proceso de expansión.

La expansión inicial es extraordinariamente importante, dependiendo de la distancia del punto considerado a los bordes de la excavación y de la planta de ésta; en excavación de 60 por 18 m, por 6 m de profundidad, se han medido expansiones iniciales rápidas al centro del área de 55 cm y de 20 cm cerca de los taludes, lo que llegó a corresponder a un 60% de la expansión total. Una vez terminada la excavación y ocurrida la expansión inicial, la evolución del fenómeno es similar a una curva de consolidación.

Uno de los factores importantes en la magnitud de expansión lo son las fuerzas de filtración que se establecen cuando comienza el flujo hacia el fondo de las excavaciones. En la Ciudad de México se han medido gradientes de 2, lo que corresponde a fuerzas de volumen de  $2 \text{ ton/m}^3$ , de magnitud suficiente para producir el agrietamiento observado en el fondo de las excavaciones; la expansión diferencial en la zona próxima a los taludes produce un agrietamiento de éstos, generalmente en una línea paralela a la corona y ubicada a la mitad de la altura.

Para reducir a un mínimo los efectos de la descarga, e han usado en la Ciudad de México varios procedimientos:

- a) Construcción de las cimentaciones con excavación parcial en el área formado zanjas o celdas de superficie reducida.
- b) Bombeo bajo el fondo de la excavación.
- c) Aplicación de electrólisis

El primer método ha dado buenos resultados en excavaciones de menos de 7 m de profundidad y con menos de  $300 \text{ m}^3$  de volumen. Los métodos segundo y tercero han comprobado su éxito una y otra vez, en especial el último, que se ha aplicado numerosas veces consiguiendo su objetivo y sin ningún parecer serio.

#### **1.4.2.5. Ademes**

Se han calculado en el subsuelo del Valle de México sobre todo con base en los criterios empíricos de Terzaghi correspondientes a suelos arenosos y cohesivos. Los resultados han sido buenos, siempre y cuando el ademado esté cuidadosamente acuñado y bien construido y conservado.

### **I.5. DISEÑO DE ESTRUCTURAS**

La funcionalidad de la estructura es adsorber las sollicitaciones que se deriven del funcionamiento de la construcción. Esquemáticamente este concepto se visualiza en forma ilustrada en la figura I-10. El subsistema estructural debe soportar una serie de acciones externas que le ocasionan deformaciones, desplazamientos y ocasionalmente daños; todas estas constituyen su respuesta ante dichas acciones.

Por acciones generalmente se denominan cargas. Pero esta concesión más general incluye a todos los agentes externos que inducen en la estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Por tanto, además de las cargas propiamente dichas, se incluyen deformaciones impuestas, como los hundimientos de la cimentación y los cambios volumétricos, así como efectos ambientales de viento, temperatura, corrosión, etc.

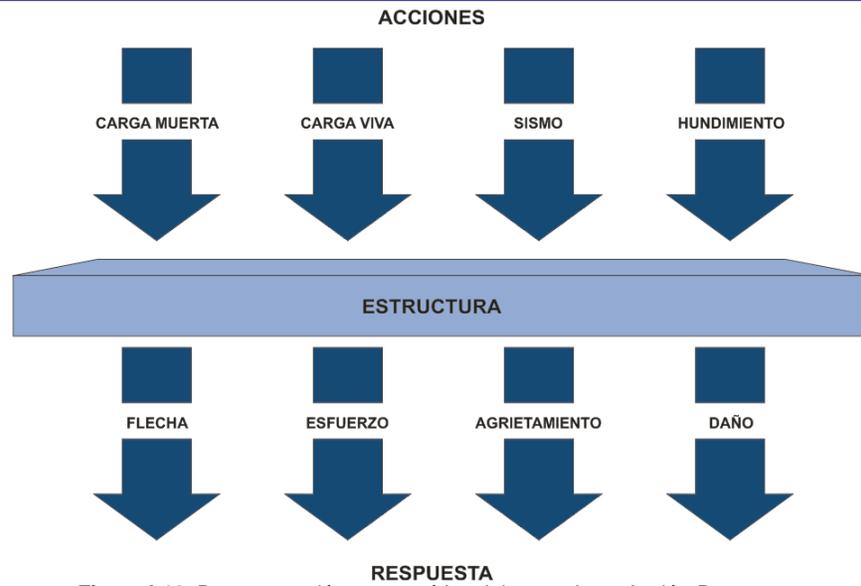


Figura I-10. Representación esquemática del mecanismo Acción-Respuesta.

Para que la construcción cumpla con las funciones para las cuales está siendo proyectada, es necesario que las respuestas de la estructura se mantengan dentro de límites que no afecten su correcto funcionamiento, ni su estabilidad. Debe definirse por lo tanto, cuales los *Límites admisibles* de la respuesta estructural (véase figura I-11); esto depende del tipo de construcción y de su destino y están definidos por las estructuras más comunes en los códigos de diseño.

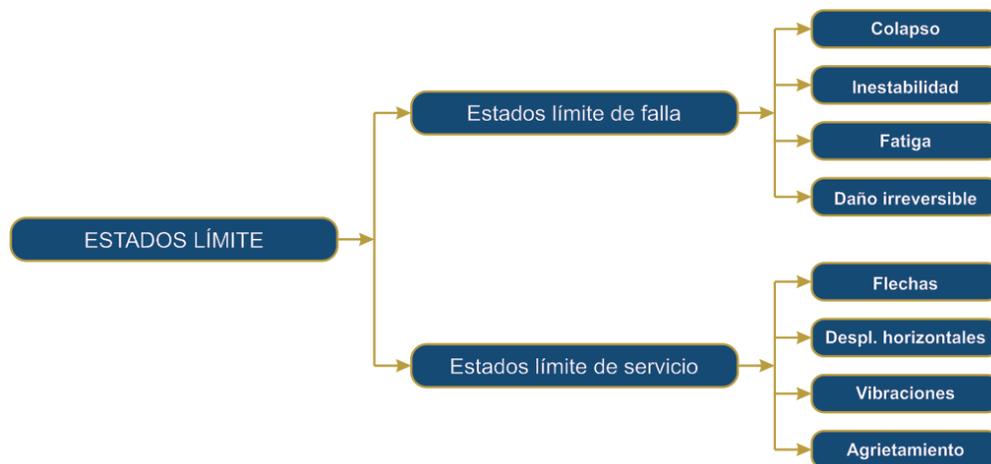


Figura I-11. Límites admisibles de la respuesta estructural.

Se llama *estado límite de una estructura* a cualquier etapa de su comportamiento a partir de la cual su respuesta se considere inaceptable. Se distingue dos tipos de estado límite. Aquellos relacionados con la seguridad, se denominan *Estados límite de falla* y corresponden a situaciones en las que la estructura sufre un fallo total o parcial, o simplemente presentan daños que afectan su capacidad para resistir nuevas acciones. La falla por cortante, flexión, torsión, carga axial o cualquier combinación de esos efectos, constituyen un estado límite de falla, así como la inestabilidad o falta de equilibrio global de la estructura, por ejemplo el pandeo de uno de sus miembros, el pandeo local de una sección y la falla por fatiga.

El otro tipo de estado límite se relaciona con aquellas situaciones que, aún sin poner el peligro la seguridad de la estructura, afectan el correcto funcionamiento de la construcción. Estos se denominan estados límite de servicio y comprenden las deflexiones, agrietamiento y vibraciones excesivas, así como el daño de elementos no estructurales de la construcción.

Entonces se deducen tres aspectos básicos de la misma, que son:

- **Resistencia.** La mayor o menor capacidad de una estructura para oponerse a la rotura.
- **Rigidez.** La mayor o menor capacidad de dicha estructura para oponerse a la deformación.
- **Estabilidad.** Se define como la capacidad de esta, para mantener su condición original de equilibrio.

Estos tres aspectos constituyen los pilares del Diseño Estructural ya que la pérdida de cualquiera de ellos (aunque fuera de forma aislada) conducirá a la misma al estado de colapso.

En las edificaciones comunes y de baja altura, los elementos estructurales con los que habitualmente se diseña una estructura (elementos estructurales, muros de pantalla, etc.) no acusan deformaciones que puedan poner en riesgo ningún elemento secundario de la construcción razón por la cual es frecuente ocuparse casi exclusivamente del problema resistente, ya que son las acciones gravitatorias las que generan las solicitaciones dominantes que definirán la forma y cuantía estructural, sin que las demás acciones (inclusive las horizontales) provoquen una interferencia capaz de influir (mayormente) en el diseño. Sistemáticamente este tipo estructural (edificios bajos) tiende al modelo de sólido de compresión, el cual goza de excelentes características de estabilidad.

Conforme la construcción comienza a crecer en altura, las acciones horizontales comienzan a dominar sobre las gravitatorias, con lo que la estructura paulatinamente abandonara el modelo de sólido de compresión para adquirir el de un verdadero voladizo empotrado en el suelo. En otras palabras, comienza a dominar el problema del estudio de la *Rigidez*, sobre el problema *Resistente*.

Concebida la estructura como un gran voladizo empotrado en el suelo, solicitado axialmente por las cargas verticales (gravitatorias) y transversalmente por las acciones horizontales (sismo o viento), el problema resistente se enmarcaría en el ámbito de la flexo-compresión.

Las fuerzas gravitatorias, por lo general, crecen linealmente con el número de pisos y no provocan importantes deformaciones (salvo que se presenten grandes asimetrías tanto geométricas, de cargas o de rigidez).

En contraste con estas, están las fuerzas horizontales, que provocan deformaciones que varían con la cuarta potencia de la altura (se trata de un voladizo), y por lo tanto, generan deformaciones capaces de superar fácilmente los rangos anteriormente citados. Diremos, por lo tanto, que en edificios en altura, la sollicitación dominante es la sollicitación horizontal.

En consecuencia desde el punto de vista estructural, un edificio se considera alto, cuando los esfuerzos dominantes del diseño son los producidos por las fuerzas horizontales.

Es evidente que no se puede establecer una altura o una cantidad de plantas ya que esto dependerá del lugar de emplazamiento del edificio, la magnitud de los vientos existentes y el grado de sismicidad de la zona.

Suele resultar frecuente que el ingeniero, se aboque al estudio resistente de una pieza, olvidándose que luego de dimensionarla debe verificar las deformaciones que se producen, por lo tanto, es muy importante que recordemos, por un momento que, la *Teoría de la Resistencia de Materiales* basa todo su desarrollo analítico-matemático en la aceptación de 6 hipótesis básicas:



- Hipótesis de la Homogeneidad del Material.
- Hipótesis de la Continuidad e Isotropía.
- Hipótesis de la Pequeñez de las Deformaciones.
- Hipótesis de la Elasticidad Perfecta del Material.
- Hipótesis de la dependencia Lineal entre Deformaciones y Cargas.
- Hipótesis de las secciones planas.

Los métodos corrientes de cálculo (incluso el de los Elementos Finitos), son definidos (es decir, aplicables) en el estado no deformado, por lo tanto, será preciso limitar las deformaciones individuales de los miembros integrantes para poder garantizar las condiciones de aplicabilidad de un determinado método o de lo contrario será preciso realizar el estudio de los mecanismos de 2º orden (que habitualmente no son tomados en cuenta o despreciados en la definición de los métodos). En caso contrario estaremos abordando a valores de sollicitaciones internas erróneos y por consiguiente a dimensionados incorrectos.

Es frecuente que los proyectistas se concentren exclusivamente en cumplir con los requisitos de seguridad y descuiden los de servicio, dado lugar a situaciones que hacen inservible la construcción, aún cuando sea adecuada la seguridad. Los requisitos de servicio se relacionan principalmente con la rigidez de estructura y de sus miembros.

## **I.6. DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS EN EL VALLE DE MÉXICO**

Durante los sismos se libera de forma brusca la energía de deformación acumulada durante períodos de tiempo elevados en las zonas de contacto entre las placas tectónicas, pudiendo producirse a mayor o menor profundidad de la corteza terrestre.

El foco o hipocentro es el lugar físico donde se produce la liberación de energía, pudiendo ser superficial (entre 0 y 70 km de profundidad) intermedio (entre 70 y 300 km) o profundo (por debajo e los 300 km).

El epicentro es el lugar de la superficie que está directamente encima de donde se ha producido la liberación de energía.

Los sismos pueden causar diferentes daños a una construcción, sin embargo, los principales efectos a tomarse en cuenta, deben ser la interacción suelo-cimentación. Durante un sismo el suelo puede presentar diversas, anomalías, entre las que se encuentran:

- Grietas en el suelo.
- Asentamientos diferenciales de suelo, especialmente en terrenos sueltos y con gran cantidad de agua.
- Licuefacción de terrenos saturados de agua, sobre todo cuando son de larga duración.
- Desplazamiento del terreno a lo largo de fallas geológicas.

Como es bien sabido la Ciudad de México es constantemente sometida a movimientos telúricos, desde principios del siglo XX se han registrados más de quince temblores superiores a cinco en la escala de Richter, siendo los dos más fuertes del siglo XX el de 1957 que midió 7,9 en la escala de Richter y el terremoto de 1985 que midió 8,1 en la escala de Richter, en estos dos terremotos colapsaron edificios construidos en los años 30s, 40s, 50s, 60s, 70s y los primeros 5 años de los 80s, la mayoría de estos edificios no cumplían con las normas de construcción a las que debían ser sometidos en zonas de alto riesgo sísmico o donde existe un riesgo mayor de colapso.

Existe conciencia desde hace mucho de la importación de los efectos locales en el Valle de México. Rosenblueth mostró que los depósitos de suelos blandos pueden amplificar apreciablemente los movimientos sísmicos registrados en suelos firmes. Estudios posteriores han demostrado que en el Valle de México los depósitos de arcilla modifican en forma significativa la intensidad y el contenido de frecuencia de los sismos que afectan a la capital. Además se demostró que los movimientos del terreno en la zona lacustre son esencialmente controlados por las características de la arcilla y que los aspectos principales de los movimientos pueden ser reproducidos por un simple modelo de propagación vertical de onda de cortante. Lo anterior está respaldado por el hecho de que los movimientos de los temblores de septiembre de 1985 se pudieron correlacionar con las propiedades dinámicas de las arcillas y con los espesores de los depósitos. Además, existe una clara correlación entre la intensidad del daño y el espesor de los depósitos de arcilla.

Aunque las arcillas en general amplifican los movimientos del terreno firme, conviene señalar que la importancia de tal amplificación depende de las características de la arcilla.

La experiencia derivada de diversos sismos ha permitido llevar a principios empíricos que deben tomarse en cuenta en la concepción de cimentaciones sometidas a sollicitaciones sísmicas. Puede en particular mencionarse las siguientes:

- En el diseño de la cimentación, es necesario buscar simetría, regularidad y distribución uniforme de cargas.
- Es recomendable evitar sistemas mixtos de cimentación (combinaciones de diferentes tipos de cimentaciones).
- Las zapatas deben ligarse mediante contratrabes que aseguren su trabajo en conjunto y contribuyan a disminuir las deformaciones locales.
- Los pilotes a las pilas deben así mismo estar unidas mediante una red bidimensional de contratrabes.
- La unión entre cimentación y estructura deben hacerse mediante elementos capaces de soportar la fuerza de cortante horizontal y eventualmente los de tracción vertical transmitidos por la estructura. Salvo que se disponga de un mejor criterio, estos elementos deben poder resistir un esfuerzo de tracción vertical al menos igual a 10% de la mayor carga vertical de compresión recibida.
- La parte superior de los pilotes (en una altura por lo menos igual a 2.5 veces su diámetro) debe considerarse como crítica y reforzarse con un porcentaje de acero transversal mayor que 0.6% para suelos blandos. La separación de estribos no debe ser mayor de 10 cm.
- También deben considerarse como críticos y reforzarse en consecuencia las zonas en las que los pilotes pasan de una capa de suelo a otra de diferente rigidez.



## I.7. CONCLUSIONES

La construcción de estructuras de concreto debe ejecutarse sin perder de vista la funcionalidad para la cual va servir, la situación económica que guarda cada una de las regiones y el entorno, además debe ponerse especial cuidado del sitio donde será erigida. El proyectista debe diseñar la estructura de una construcción como un conjunto sin menospreciar ningún aspecto que pudiera aportar información para un diseño más óptimo, para que de esta forma evitar modificaciones y adaptaciones de la construcción e inclusive daños por acciones no consideradas en el diseño estructural, en decremento de la economía del dueño.

La Ciudad de México presenta un gran número de problemas para la erección de una estructura, sobre todo pesadas, como son: la estratificación donde será desplantada y levantada la estructura, la problemática que encierra el subsuelo, el hundimiento acelerado en algunos puntos del Valle, la extracción de agua del acuífero sin una recarga adecuada que conlleva a una consolidación de la capa arcillosa y el estar en una zona altamente sísmica y que dichas ondas se intensifiquen en la zona clasificada como de Lago. Por todo lo anterior, es obligado que ingeniero proyectista se vea forzado a redoblar esfuerzos ya que los problemas que entraña la Ciudad de México son por mucho superiores a los que se presentan en otras regiones pobladas.

Debido a todas estas dificultades, es difícil proyectar una estructura de concreto que mantenga sus condiciones iniciales, tanto de resistencia, rigidez y estabilidad, sin tener en cuenta todos los aspectos del diseño estructural y específicamente el diseño de cimentaciones, por tal motivo es indispensable que se lleve a cabo de forma periódica una revisión de las estructuras levantadas en la Ciudad de México para evaluar los daños a los que se ven sometidas las grandes estructuras, y sus construcciones colindantes.

## CAPÍTULO II

# PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y LOS ESTUDIOS PATOLÓGICOS

### II.1. INTRODUCCIÓN

El empleo de morteros como agentes cementantes data de más de 3500 años, ya que los antiguos egipcios lo utilizaron, como aglomerantes en la construcción de las pirámides. Estos conocimientos fueron pasando de civilización en civilización, así se tiene que los romanos conocían la técnica de producción de morteros y su empleo como material de construcción. Es solo hasta el siglo XIX cuando surge el cemento Portland y la industria de éste.

Desde la invención de los hornos rotatorios y los molinos; al comienzo del siglo XX, que permitieron producir cemento Portland en cantidades industriales, hubo un desmesurado desarrollo de las estructuras de concreto reforzado, que siempre se consideró el concreto hidráulico era un material prácticamente imperecedero, por su solidez, su dureza, su alta resistencia mecánica (específicamente a la compresión) e incombustibilidad.

Con el transcurso de los años, hubo importantes desarrollos tecnológicos en la química de los cementos; la calidad y el comportamiento de los agregados naturales y artificiales; las características del agua de mezclado y de curado; el uso de adictivos y adiciones; las técnicas de producción, manejo y colocación del concreto; las prácticas de producción y curado; y el desarrollo de muchas clases especiales de cementos, que desde luego han contribuido a ratificar esa condición de material duradero.

Sin embargo, el concreto en su misma condición de piedra artificial, al igual que las rocas naturales, también puede sufrir modificaciones en su sólida estructura, si existen agentes (internos o externos) que con el paso del tiempo lo puedan deteriorar.

Por ello, desde la década de 1960, se empezó a gestar (principalmente en Inglaterra, Francia y Alemania), como consecuencia de una conciencia colectiva, la defensa del patrimonio, poniendo cuidado a la conservación y reparación de toda suerte de estructuras de concreto reforzado, dando origen al entendimiento de los mecanismos de daño y al estudio formal de la «**patología del concreto**», pero sobre todo a la prevención de las fallas.

Como se sabe, el concreto es el material de ingeniería de mayor consumo en la actualidad, estimándose del orden de 9,000 millones de toneladas por año a inicios del siglo XXI.

El concreto presenta un comportamiento típico de los materiales cerámicos, esto es, muy buena resistencia a la compresión pero muy escasa a la tensión (tracción), por lo que para mejorar sus prestaciones se le refuerza con acero. El acero se encuentra protegido contra la corrosión, dado el alto nivel de alcalinidad del concreto, sin embargo, bajo diversas circunstancias se puede dar lugar al ataque del acero y, por lo tanto, se podrán presentar fallas del concreto reforzado. El problema de deterioro de estructuras de concreto reforzado, es tan importante que algunos estudios realizados en EUA arrojan que en la década de 1990, el costo de este problema fluctuaba entre 150,000 y 200,000 millones de dólares por año (sólo en EUA). El problema afecta a todas las estructuras de concreto (puentes, túneles, edificios, carreteras, etc.), las cuales demandan programas de mantenimiento preventivo para evitar que el deterioro causado por los agentes agresores provoque su colapso.

## II.2. DEFINICIÓN DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y SUS ALCANCES

**Patología** es una rama de la medicina que estudia todo lo referente a las enfermedades. Mientras que un **diagnóstico** sirve para determina la naturaleza de una enfermedad a partir de los síntomas que presenta un enfermo, de éste diagnóstico depende el tratamiento.

Por lo tanto, la **Patología de la construcción** puede ser definida como la parte de la ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y las consecuencias de los defectos de las obras civiles, o sea, es el estudio sistemático de los procesos y características de las «enfermedades» o los «defectos y daños» que puede sufrir una construcción, sus causas, sus consecuencias y sus remedios. El alcance de la patología de la construcción, se puede visualizar en el esquema de la figura II.1.

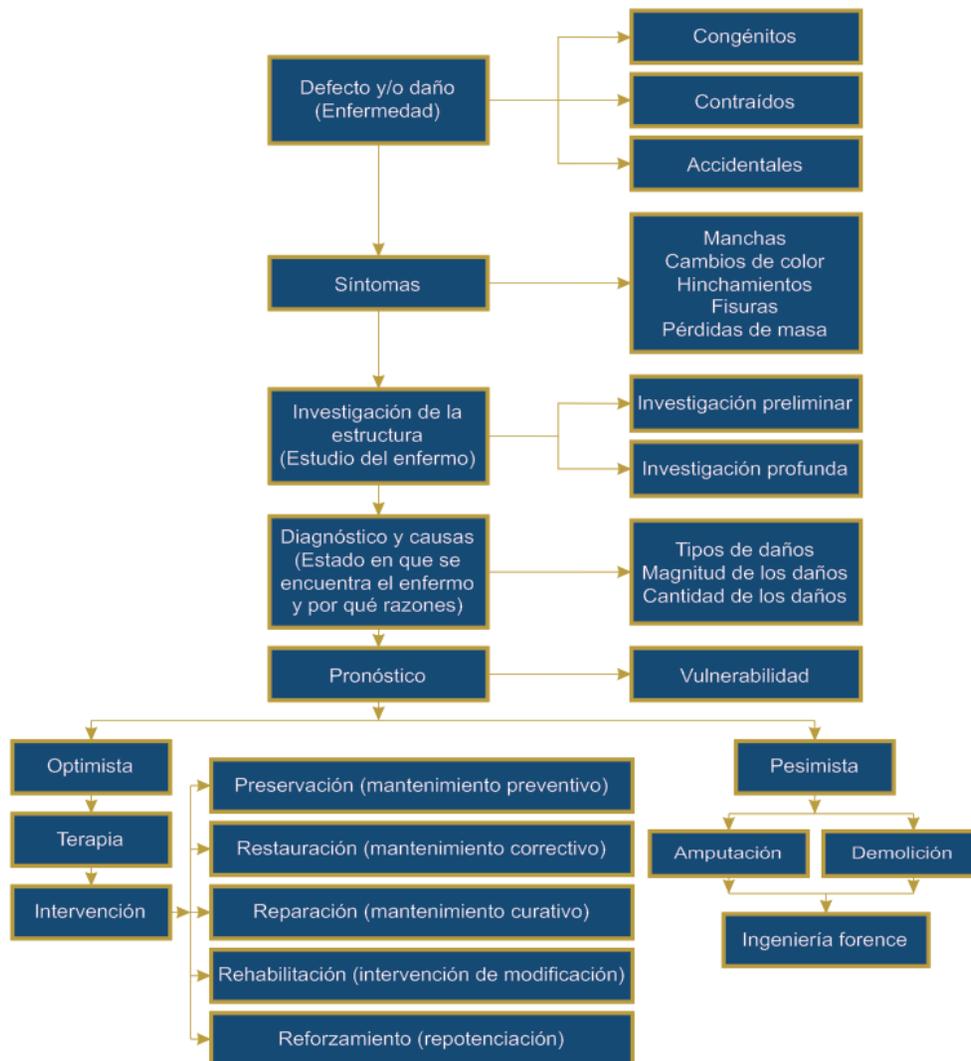


Figura II.1. Modelo secuencial de los procesos que sigue la patología de la construcción.

Debemos de entender que las construcciones al igual que los seres vivos, pueden sufrir enfermedades y lesiones (defectos o daños), que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunas de ellas pueden ser congénitas, es decir, que estuvieron presentes desde su concepción y/o construcción; otras pueden haberse contraído durante algunas etapas de su vida útil; y otras puede ser consecuencia de accidentes.

Según el modelo presentado, las enfermedades se manifiestan mediante algunos síntomas que están representados por fenómenos que exhibe el concreto, tales como: manchas, cambios de color, hinchamiento, fisuras, pérdidas de masa u otros.

Por ellos, se adelanta una investigación de la estructura (estudio del enfermo), que incluye una investigación preliminar y una investigación profunda, las cuales comprenden un conocimiento previo, antecedentes o historial (sobre aspectos como cargas de diseño, el microclima que rodea a la estructura, el diseño, la vida útil, el proceso constructivo, las condiciones actuales y el uso, cronología de daños, entre otras); una inspección visual (condiciones de la estructura) ; una auscultación de los elementos afectados (mediante mediciones de campo y pruebas no destructivas); una exploración (remociones y sondeos); una evaluación o análisis estructural (chequeo de la capacidad estructural y determinación de la resistencia residual de la estructura mediante métodos empíricos, métodos analíticos o pruebas de carga); y una extracción, ensayo o análisis de muestras (ensayos de evaluación física, mecánica, química, biológica y/o microscópica, que permiten establecer mecanismos de daño).

Según el mismo modelo, posteriormente, se correlacionan los antecedentes; las inspecciones, mediciones, auscultamientos y exploraciones, realizados en los elementos afectados de la estructura; y los resultados de los ensayos físicos, mecánicos, químicos, biológicos y petrográficos obtenidos de las muestras extraídas, para establecer y diagnosticar apropiadamente el tipo, la magnitud y la cantidad, de los diferentes daños en los elementos y estructuras evaluadas, con sus más probables causas de ocurrencia.

Con base en el diagnóstico (estado en que se encuentra el enfermo), se evalúa la condición de servicio y se genera un pronóstico sobre el comportamiento futuro de los elementos afectados y de la estructura en general. Este pronóstico puede ser *optimista* o *pesimista*. En el pronóstico optimista se puede aplicar una terapia apropiada (intervención) para lograr alguna de las siguientes acciones y condiciones:

- **Preservación.** Proceso de mantener una estructura en su condición presente y contrarrestar posteriores deterioros.
- **Restauración.** Proceso de restablecer los materiales, la forma o la apariencia que tenía una estructura en una época determinada.
- **Reparación.** Proceso de reemplazar o corregir materiales, componentes o elementos de una estructura, los cuales se encuentran deteriorados, dañados o defectuosos.
- **Rehabilitación.** Proceso de reparar o modificar una estructura hasta llevarla a una condición deseada (intervención de modificación).
- **Reforzamiento.** Proceso mediante el cual se incrementa la capacidad de una estructura o una parte de ella, para resistir cargas.

Sin embargo, para tener éxito en las medidas terapéuticas, es necesario que el diagnóstico haya sido bien definido.



En el pronóstico *pesimista*, es posible que la estructura tenga que sufrir amputaciones o la propia demolición.

Un diagnóstico adecuado y completo es aquel que establece todos los aspectos del problema, o sea que toma en cuenta:

- Los síntomas de la enfermedad.
- El origen de la enfermedad.
- Los mecanismos que provoca el mal funcionamiento.
- Las consecuencias de la enfermedad.
- Las medidas terapéuticas de corrección de la enfermedad.

### II.2.1. SÍNTOMAS (ENFERMEDADES)

Los problemas patológicos, salvo raras excepciones, presentan manifestaciones externas comunes, a partir de las cuales se puede deducir cual es su naturaleza, el origen y los mecanismos de los fenómenos involucrados, así como estimar sus probables consecuencias. Estas enfermedades, también denominadas defectos, daños, lesiones o manifestaciones patológicas, son los síntomas que presenta una construcción y que pueden ser descritos y clasificados, orientando un primer diagnóstico, a partir de detalladas y experimentadas observaciones visuales.

Distinguiremos entre defectos y daños del modo siguiente: Existe defectos cuando los esfuerzos continuos o algunos aspectos negativos de la construcción en los materiales supera el límite de solidez o resistencia de estos materiales; los daños son consecuencia de los defectos y, por lo general, aparece en la superficie de los elementos, pero también pueden presentarse en su interior, tras una superficie intacta.

Los síntomas más comunes y de mayor incidencia en el concreto reforzado son las fisuras activas o pasivas, las eflorescencias (degradación química), las flechas excesivas, las manchas superficiales en el concreto arquitectónico, la corrosión de las armaduras, las oquedades superficiales u huecos dejados por el colado. De acuerdo a la figura II.2, ciertas manifestaciones tienen elevada incidencia, como por ejemplo, las manchas superficiales, sin embargo, desde el punto de vista de las consecuencias en relación al comportamiento estructural y al costo de reparación del problema una fisura de flexión o la corrosión de las armaduras pueden ser más significativas y más graves.

#### II.2.1.1. Daños, lesiones o enfermedades menores

Generalmente se acepta que mientras una lesión no afecta a la estructura o a la cohesión de la construcción, sea considerado como de grado menor. Esto es, que desde un punto de vista constructivo no pasa de ser un defecto más o menos importante, pero que cuya reparación será relativamente sencilla y no tiene carácter urgente ni pone en peligro la edificación.

La verdadera lesión aparece cuando el fallo sobrepasa los límites que acabamos de mencionar y amenaza con dañar seriamente la obra. Las lesiones acostumbran a ser entonces peligrosas y requieren una rápida intervención para atajar el mal.

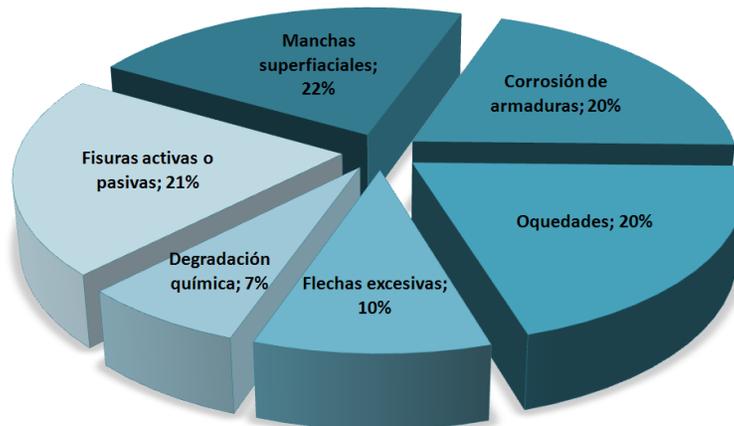


Figura II.2. Distribución relativa de la incidencia de las manifestaciones patológicas en estructuras de concreto.

Al respecto es curioso constatar que, en muchas de las lesiones suelen tener su origen en un defecto inicial. Es corriente, por lo tanto, que en un defecto no tratado pueda evolucionar con el paso del tiempo y convertirse en una lesión o enfermedad. De ahí que resulte un poco difícil deslindar ambos campos para establecer una clasificación correcta, ya que una misma anomalía puede considerarse defecto o lesión según el grado que alcance. El ejemplo más fácil de comprender, en este aspecto, lo facilitan las grietas. Un agrietamiento superficial no tiene, como es lógico suponer, el mismo valor negativo que una grieta que afecte a la masa de concreto de una columna o de una viga maestra.

En un principio, las lesiones menores pueden referirse a defectos a fallos que se atienden, prioritariamente, por razones estéticas, aunque el tratamiento corrector y protector de la obra debe acometerse, principalmente para evitar que el daño se extienda o que pueda degenerar en una lesión importante. El conjunto de medidas que se tomen al efecto, recibe el nombre genérico de reparación, concepto que supone siempre la corrección de una situación anómala.

### II.2.2. ORIGEN

El origen que puede causar lesiones patológicas en las estructuras de concreto armado, que obligan a recurrir a sistemas de reparación o esfuerzo, pueden ser múltiples, pero pueden tipificarse y englobarse en cuatro grupos:

- Por diseño.
- Por los materiales.
- Por la ejecución.
- Por el uso.

Si por un lado las tres primeras etapas representan un período de tiempo relativamente corto (en general menos de dos años) por otro lado, las construcciones deben ser utilizadas durante períodos largos (en general más de cincuenta años para edificaciones y más de cien para presas y obras de importancia social). Ciertos problemas como por ejemplo los resultantes de las reacciones álcali-agregados, sólo aparecen con intensidad después de seis a doce años. Hay casos de corrosión de armaduras en losas de entresijos de departamentos que se manifestaron intensamente sólo después de trece años.



Un diagnóstico adecuado del problema debe indicar en qué etapa del proceso constructivo tuvo origen el fenómeno. Por ejemplo, una fisura de momento flexionante en vigas, tanto pudo ser un diseño inadecuado, como por la calidad inferior del acero usado; tanto por la mala ejecución con un concreto de resistencia inadecuada, como por la mala utilización que se hace del elemento, con la colocación sobre la viga, de cargas mayores a las previstas inicialmente. Para cada origen del problema existe la terapia más adecuada, aunque el fenómeno y los síntomas pueden ser los mismos.

Cabe resaltar que la identificación del origen del problema permite también identificar, para fines judiciales, quien cometió la falla. Así, si el problema tuvo origen en la fase de proyecto, el proyectista falló; cuando el origen está en la calidad del material, fue el fabricante quien fallo; si se presenta en la etapa de ejecución, se trata de la falla de mano de obra, omisión de la supervisión o de la constructora; si en la etapa de uso, la falla es de operación y mantenimiento.

Un elevado porcentaje de las manifestaciones patológicas tiene origen en las etapas de planeación y proyecto, como se muestra en la figura II.3. Las fallas de planeación y proyecto son en general más graves que las fallas de calidad de los materiales o de la mala ejecución. Es siempre preferible invertir más tiempo en el detallado de la estructura, que por falta de inversión, tomar decisiones apresuradas y adaptadas durante la ejecución.

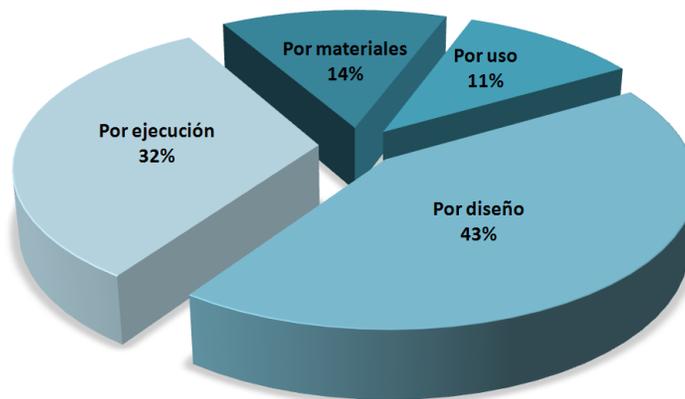


Figura II.3. Origen de los problemas patológicos con relación a las etapas de producción y uso de las obras civiles.

De las fallas que presenta una estructura, aproximadamente 45% se detectan durante la fase constructiva; 17% antes de cumplir el tiempo de garantía; y 38% después del tiempo de garantía, este último presenta su mayor porcentaje entre los siete y diez años (véase figura II.4).

La detección de fallas a partir de los 20 años, no suelen aparecer daños originados por razones de proyecto, ejecución y materiales, pero si los debidos:

- Al mal uso de la construcción.
- Agresiones ambientales.
- Envejecimiento de la misma.

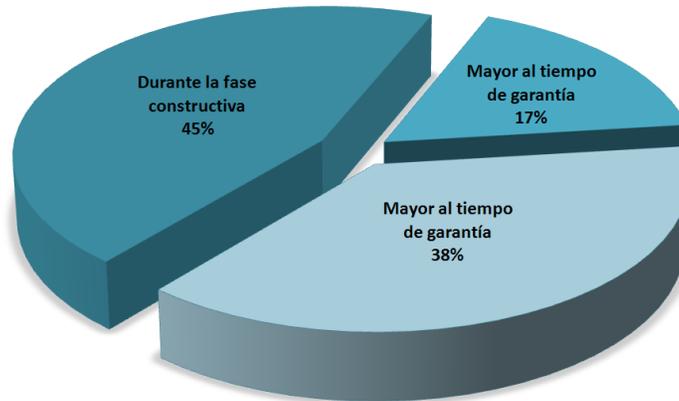


Figura II.4. Detección de fallas en las construcciones.

Las reparaciones y refuerzos de las construcciones tienen la finalidad de corregir estas deficiencias procurando llevar a las mismas al nivel de seguridad exigidas en el proyecto.

El refuerzo también se utiliza cuando se requiere aumentar la capacidad resistente de la estructura sana cuando por su uso estará sometida a sollicitaciones superiores a las previstas en el proyecto original.

Las enfermedades en las construcciones, como ya se mencionó, pueden tener origen congénito o adquirido en el tiempo, ocasionando riesgos de una acción o causa de daño desde la misma etapa del proyecto o diseño al concebir mal una estructura, durante la ejecución por deficiente planeación y organización de esta labor, o durante el periodo de servicio al estar expuestas en mayor o menor grado al ataque de un medio ambiente que puede llegar a ser muy agresivo.

Referente a las enfermedades congénitas, la construcción nace con ésta y su origen obedece a dos causas: deficiencias de concepción o diseño (arquitectónico, estructural) o deficiencias durante la ejecución o construcción de la obra. Los síntomas o consecuencias pueden manifestarse inmediatamente o durante el periodo de servicio, actúan directa o indirectamente sobre la construcción dependiendo del tipo de error. Pero siendo numerosas veces la mayor causa de pérdidas totales.

Las enfermedades adquiridas con el tiempo por acción o causa del medio ambiente, al prestar un servicio determinado, se manifiestan durante la vida útil, presentando síntomas inherentes al tipo de acción y agresor que los ha causado (véase figura II.5).

#### II.2.2.1. Causas o acciones de daño de enfermedades congénitas

Las principales causas son debidas:

- Por deficiencia de concepción.
- Por deficiencias de ejecución.

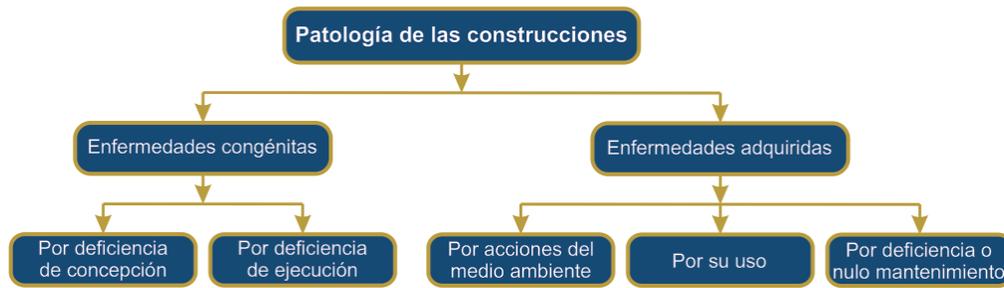


Figura II.5. Origen de las enfermedades en las construcciones.

Los errores o deficiencias de concepción o diseño pueden ser de diversa índole: mala ubicación, mala orientación y distribución de la estructura, problemas de suelo, de cálculo estructural o mala especificación de materiales. Pueden actuar directamente o indirectamente sobre la estructura, causando en ocasiones la pérdida total de la construcción.

Los errores de ejecución y construcción frecuentes (que muchas veces no se toman en cuenta, como materiales inadecuados, deficiente recubrimiento, concreto permeable, poroso, o mala distribución y colocación del acero) actúan directamente sobre la construcción permitiendo en la mayoría de los casos un aceleramiento del ataque agresivo que disminuye la vida útil.

Las acciones causadas por deficiencias de materiales ocurridas durante la concepción o ejecución y que incorporan agentes agresivos provocan daños internos en las estructuras que pueden ser considerables, esto provoca una más fácil agresión de los agentes externos.

### II.2.2.2. Causas o acciones de daño de enfermedades adquiridas

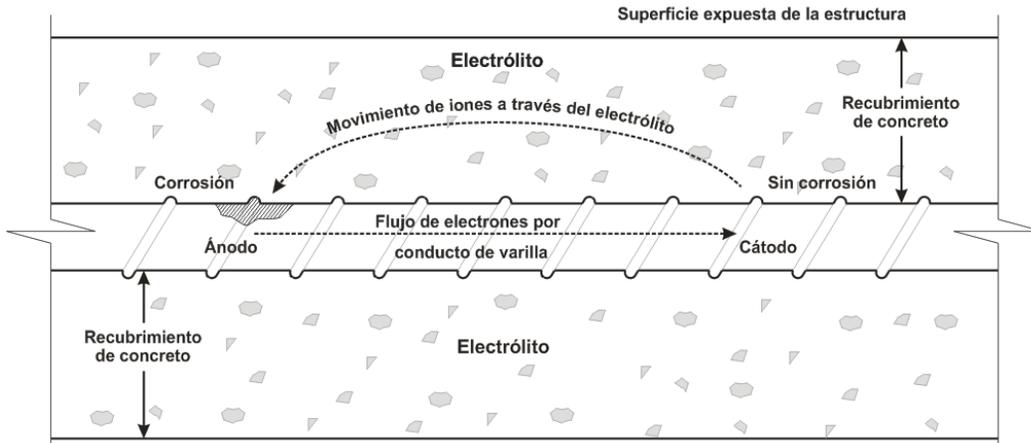
Los factores de enfermedades de este tipo comprenden aquellas que se van adquiriendo a través del tiempo, las cuales son:

- Por acciones del medio ambiente.
- Por el uso.
- Por deficiente o nulo mantenimiento.

Estos factores provocan una continua y persistente deterioro de los materiales de la construcción.

### II.2.3. MECANISMOS

Todo problema patológico, llamado en lenguaje jurídico vicio oculto o vicio de construcción (daño oculto), ocurre a través de un proceso, de un mecanismo. Por ejemplo, la corrosión de la armaduras en el concreto armado es un fenómeno de naturaleza electroquímica, que puede ser acelerado por la presencia de agentes agresivos externos (del ambiente) o internos (incorporados al concreto). Para que la corrosión se manifieste es necesario que haya oxígeno (aire), humedad (agua), y el establecimiento de una célula de corrosión electroquímica (heterogeneidad de la estructura), que solamente ocurre después de la despasivación de la estructura (véase figura II.6).

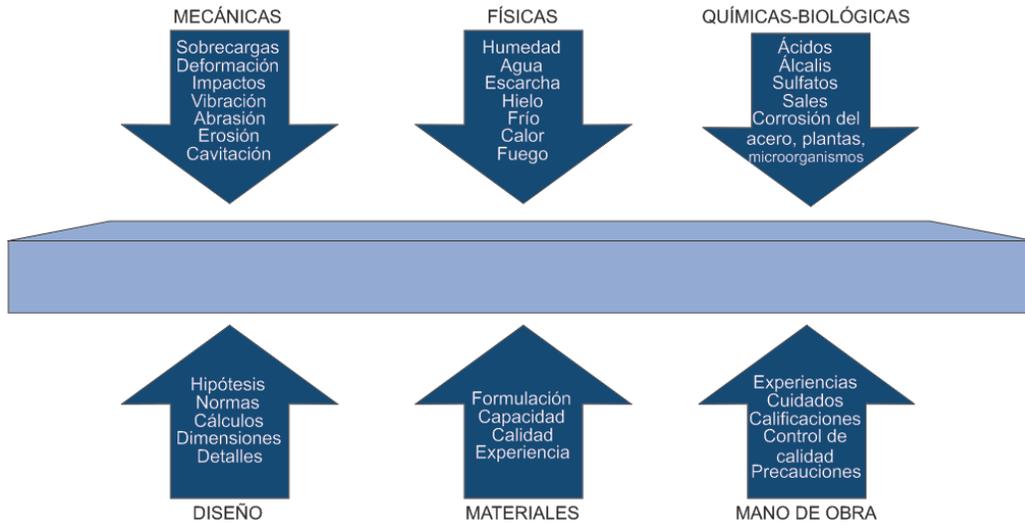


**Figura II.6.** Célula de corrosión electroquímica en el concreto armado.

Los agentes causantes de los problemas patológicos pueden ser varios; cargas, variaciones de humedad, variaciones térmicas intrínsecas y extrínsecas al concreto, agentes biológicos, incompatibilidad de materiales, agentes atmosféricos y otros.

En el caso de una fisura en una viga por la acción de momentos flexionantes, el agente causante es la carga. Sin embargo, también puede deberse a agentes causantes tanto de variaciones de humedad (retracción hidráulica por falta de curado) como agentes térmicos resultantes del calor de hidratación del cemento, o gradientes térmicos resultantes de variaciones diarias y anuales de la temperatura ambiente. Evidentemente, a cada causa corresponderá una terapia más adecuada y más duradera.

Tomando un “Modelo de equilibrio” como el que se muestra en la figura II.7, se puede aclarar muchos conceptos sobre los mecanismos de falla de una estructura de concreto.



**Figura II.7.** Modelo de equilibrio de la durabilidad el concreto.



### II.2.3.1. Acciones físicas.

Las acciones físicas se refieren esencialmente a los cambios volumétricos que experimenta en concreto, como consecuencia de cambios de humedad (agua líquida, vapor de agua, escarcha, hielo) y/o de temperatura (frío, calor, fuego), pero también las acciones físicas hacen referencia a las variaciones de su masa (cambios de peso unitario, porosidad y permeabilidad).

### II.2.3.2. Acciones mecánicas.

Dentro de los factores de deterioro imputables a las acciones mecánicas están la deformación lenta (fluencia), las sobrecargas y deformaciones impuestas (fisuras estructurales, deflexiones y movimientos excesivos, imprevistos o fortuitos y las fracturas y los aplastamientos), los impactos, las vibraciones excesivas y los daños por abrasión (frotamiento, rozamiento, percusión, erosión y cavitación) que están relacionadas con el uso que se da a la estructura.

### II.2.3.3. Acciones químicas.

Como factores de deterioro que se asignan a las acciones químicas están, el ataque de ácidos, la lixiviación por agua blandas, la carbonatación, la formación de sales expansivas (ataques de sulfatos) y la expansión destructiva de las reacciones álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

### II.2.3.4. Acciones biológicas.

Como consecuencia de la bioreactividad que ofrecen las superficies de concreto y de mortero, aparentemente por la disminución del pH sobre sus mismas superficies, se dan las condiciones para la colonización, establecimiento y desarrollos de microorganismos de origen animal o de origen vegetal, que también afectan la durabilidad del concreto.

## II.2.4. CONSECUENCIAS

Un buen diagnóstico se completa con algunas consideraciones sobre las consecuencias del problema en el comportamiento general de la estructura, o sea, un pronóstico del problema.

De forma general se acostumbra separar las consideraciones en dos tipos: las que afectan las condiciones de seguridad de la estructura (asociados al estado límite último) y las que componen las condiciones de higiene, estética, etc., o sea, las denominadas condiciones de servicio y funcionamiento de la construcción (asociados a los estados límite de utilización).

Como ya mencionamos los problemas patológicos son evolutivos y tienden agravarse al transcurrir el tiempo, además de arrastrar otros problemas asociados al problema inicial. Por ejemplo, una fisura de momento flexionante puede dar origen a la corrosión de las armaduras; flechas excesivas en vigas y losas pueden conducir a fisuras en muros y deformaciones en pisos rígidos apoyados sobre elementos flexionados.

Se puede afirmar que las correcciones serán más durables, más efectivas, más fáciles de ejecutar y mucho más económicas, cuando antes fueran ejecutadas. La demostración más efectiva de esta afirmación es la llamada "ley de SITTER" que prevé los costos crecientes según una progresión geométrica. Dividiendo las etapas de construcción y de uso en cuatro períodos, correspondientes al de diseño, al de ejecución propiamente dicha, al de-

mantenimiento preventivo efectuado antes de los tres primeros años, y al de mantenimiento correctivo efectuado posterior al surgimiento de los problemas, a cada uno corresponde un costo que sigue una progresión geométrica de razón cinco conforme se observa en la figura II.8.

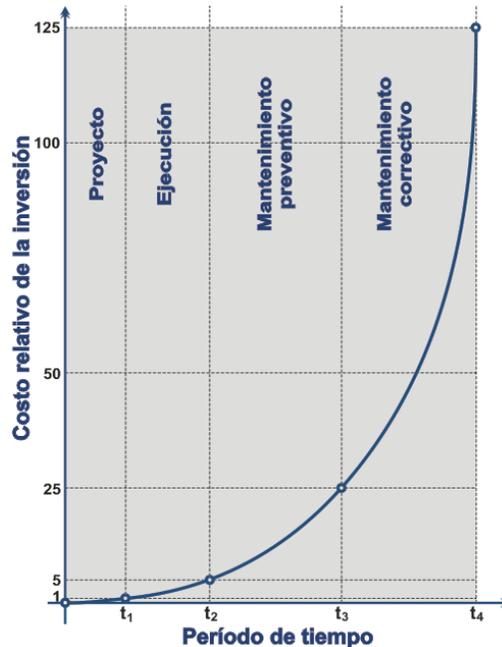


Figura II.8. Ley de evaluación de los costos ("ley SITTER").

Una interpretación adecuada de cada uno de estos períodos puede ser la que sigue:

- **Proyecto.** Toda medida tomada a nivel de diseño con el objetivo de hacer más eficiente la protección y la durabilidad de la estructura, por ejemplo, aumentar el espesor del recubrimiento de refuerzo, reduciendo la relación agua/cemento del concreto, especificar tratamientos protectores superficiales, escoger detalles constructivos adecuados, especificar cemento, aditivos y adiciones para aportarles características especiales y otras, implica un costo que podemos asociar al número 1 (uno) de la gráfica de la figura II.8.
- **Ejecución.** Toda medida fuera del proyecto, tomada durante la ejecución propiamente dicha, incluye en ese período la obra recién construida, implica un costo 5 (cinco) veces superior al costo que hubiese ocasionado si esta medida hubiera sido tomada a nivel de diseño, para lograr el mismo grado de protección y durabilidad de la estructura. Un ejemplo típico sería la decisión en obra de reducir la relación agua/cemento para aumentar la durabilidad del concreto y protección de las armaduras. La misma medida tomada durante el proyecto permitiría el redimensionamiento automático de la estructura, considerando un concreto de resistencia a compresión más elevado, de menor módulo de deformación, de menor deformación diferida y de mayores resistencias a bajas edades. Estas nuevas características del concreto traerían la reducción de las dimensiones de los elementos estructurales, ahorro en cimbra, reducción en cuantía de acero, reducción de volumen y peso propio, etc. Esta medida tomada en obra, a pesar de ser eficaz y oportuna desde el punto de vista de la durabilidad, ya no propicia alteraciones que mejoren los elementos estructurales que fueron antes definidos en el diseño estructural.



- **Mantenimiento preventivo.** Toda medida tomada con antelación y previsión, durante el período de uso y mantenimiento de la estructura, puede ser asociado a un costo 5 (cinco) veces mayor que aquel necesario para la corrección de los problemas a partir de una intervención no preventiva tomada con precedencia a la manifestación explícita de patologías. Al mismo tiempo estará asociada a un costo 25 (veinticinco) veces superior a aquel que habría ocasionado una decisión de proyecto para la obtención del mismo grado de protección y durabilidad de la estructura. Como ejemplo puede citarse la eliminación de moho ácido y la limpieza de la fachada, resanes y remiendos de las superficies expuestas, pinturas con barnices hidrofugantes, renovación y construcción de botaguas, goteras, pretilas y otras medidas de protección.
- **Mantenimiento correctivo.** Corresponde a los trabajos de diagnóstico, pronóstico, reparación y protección de la estructura que ya presentan manifestaciones patológicas, o sea, corrección de problemas evidentes. A estas actividades se le puede asociar un costo 125 (ciento veinticinco) veces superior al costo de las medidas que podrían hacerse tomado a nivel de proyecto y que redundarían en un mismo grado de protección y durabilidad que se estime de la obra a partir de la corrección.

Según SITTER, colaborador del CEB (Comité Euro-internacional du Béton) autor de esta ley de costos, aplazar una intervención significa aumentar los costos directos en progresión geométrica a razón de 5 (cinco).

### II.2.5. TERAPIA

Las medidas terapéuticas de corrección de los problemas pueden tanto incluir pequeñas reparaciones localizadas, como una recuperación generalizada de la estructura, o refuerzos de los cimientos, columnas, vigas o losas. Es siempre recomendable, que después de cualquiera de las intervenciones citadas, sean tomadas medidas de protección de la estructura, con la implantación de un programa de mantenimiento periódico. Este programa de mantenimiento debe tener en cuenta la vida útil prevista, la agresividad de las condiciones ambientales de exposición y la naturaleza de los materiales, y medidas protectoras adoptadas.

La selección de los materiales y la técnica de corrección a ser empleada dependen del diagnóstico del problema, de las características de la zona a ser corregida y de las exigencias de funcionamiento del elemento que va a ser objeto de la corrección. Por ejemplo, en los casos de los elementos estructurales que necesitan ser colocados en carga después de algunas horas de la corrección puede ser necesario y conveniente, utilizar sistemas de base epóxica o poliéster. En los casos de plazos algo más prolongados (días), pudiera ser conveniente utilizar morteros e inyección de lechadas a base de mineral, y en condiciones normales de sollicitación (después de veintiocho días) los materiales podrían ser morteros y concretos correctamente dosificados.

### II.3. DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL

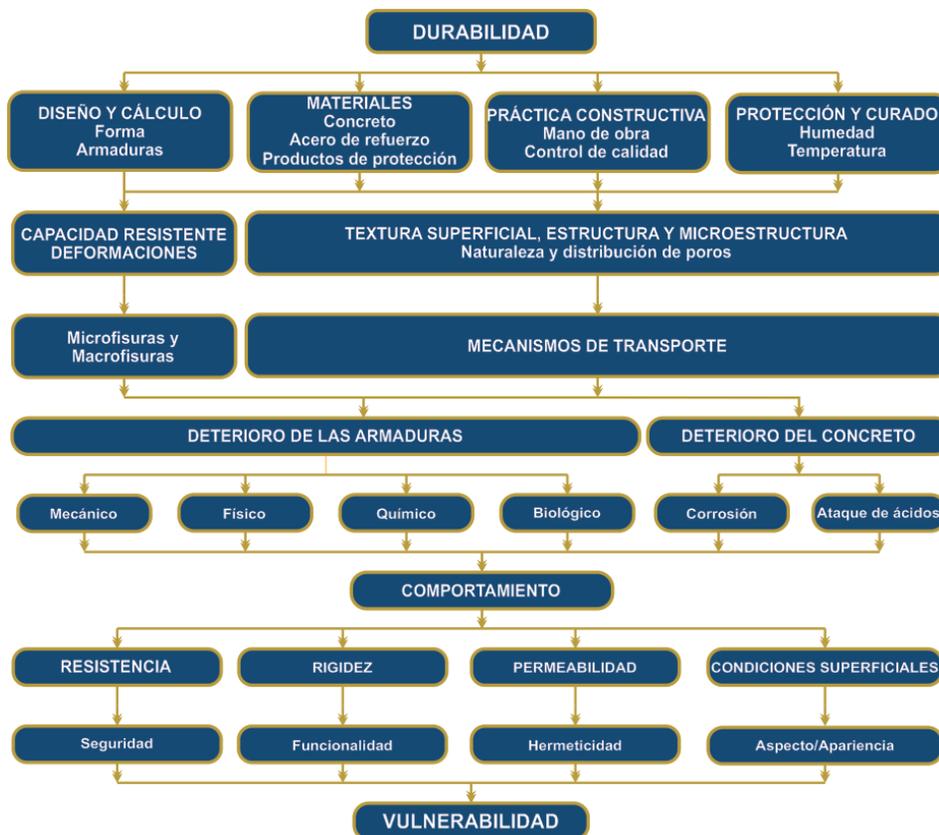
En general, las construcciones tanto las antiguas como las modernas (ya sean de concreto armado, o de otros materiales como piedra, madera, metal o sus combinaciones) sufren deterioros en mayor o menor grado a través del tiempo.

Contrario a lo que se pensaba las estructuras de concreto con el paso del tiempo, con la contaminación ambiental ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , entre otros), con la disminución y optimización en el diseño de las secciones de los diferentes elementos de las estructuras (vigas, columnas) se ha convertido en un material aceptablemente durable que sufre deterioros y degradaciones y no es eterno como se pensó en un principio.

Estos deterioros como en los seres humanos, tienen su origen en enfermedades congénitas o adquiridas durante la vida útil que afecta su funcionalidad y estabilidad que, en ocasiones, no cumplen con los fines para los que fueron diseñados.

La mayoría de los autores sostienen que la durabilidad del concreto hidráulico puede definirse como su capacidad para resistir la acción del medio ambiente que lo rodea, de los ataques químicos o biológicos, de la abrasión y/o de cualquier otro proceso de deterioro.

Considerando el modelo de la figura II.9, como factores determinantes de la durabilidad de una estructura de concreto están; el diseño y cálculo de la estructura (geometría y cuantía de acero de refuerzo); los materiales empleados (concreto, acero y productos de protección); las prácticas constructivas (calificación de la mano de obra y control de calidad); y los procedimientos de protección y curado (condiciones de humedad y de temperatura).



**Figura II.9.** Relación entre los conceptos de durabilidad y comportamiento del concreto.

Lo anterior, genera una capacidad resistente y de deformación máxima permisible ante las cargas de servicio; desarrolla una textura superficial para el intercambio con el exterior (micro-clima); y también permite obtener una estructura y microestructura del concreto, que a su vez define la naturaleza y distribución de poros al interior de la masa.

Si la capacidad resistente es rebasada, hay deformaciones impuestas u otro tipo de acciones mecánicas (por ejemplo, impacto, vibración, abrasión, etc.), invariablemente aparecerán microfisuras y macrofisuras, consideradas como el deterioro mecánico. Pero, también, dependiendo del tipo, tamaño y distribución de los poros y fisuras, se establece una cierta y determinada porosidad a través de la cual aparecen los mecanismos de transporte de fluidos (gases o líquidos, con o sin-



sustancias suspendidas o disueltas) que ayudados a su vez por el efecto de la temperatura, la humedad y/o la abrasión, permiten iniciar y/o propagar el deterioro del concreto por acciones físicas, químicas y/o biológicas, o del refuerzo por el fenómeno de corrosión.

Por lo tanto, el tipo, cantidad y magnitud de los procesos de degradación del concreto (mecánicos, físicos, químicos y/o biológicos) de las armaduras de refuerzo activas o pasivas (corrosión y/o ataque de ácidos), determina a través del tiempo la resistencia, la rigidez y la permeabilidad de los diferentes elementos que conforman la estructura. También las condiciones superficiales de la estructura influyen en estos y otros factores y todo ello se refleja en seguridad, funcionalidad, hermeticidad, aspecto y apariencia de la estructura. En resumen, esto determina el comportamiento de la estructura y su vulnerabilidad (cuantificación de potencial de mal comportamiento con respecto a una sollicitación).

## II.4. CICLO DE VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Debido a que las estructura de concreto simple o reforzado están expuestas, no solamente a acción mecánica de las cargas de servicio, sino también, a otros factores que tienden a deteriorarlas y destruirlas como: acciones físicas (cambios bruscos de temperatura y humedad); algunas veces a agresiones de carácter químico o biológico; y eventualmente, a otras acciones mecánicas, se hace indispensable profundizar, no sólo, en el diseño y especificaciones de las mezclas de concreto (desde el punto de vista de la durabilidad); sino también a la concepción y el diseño de los elementos estructurales y arquitectónicos; en los procesos y técnicas de construcción; en la metodología de protección, curado y puesta en servicio; y, en los procedimientos de inspección y mantenimiento de las estructuras.

Como consecuencia de lo anterior, debe entonces definirse el concepto de la «Vida útil» de la estructura, el cual tiene relación con el comportamiento de la misma, bajo unas ciertas y determinadas condiciones de servicio, durante un período de tiempo suficientemente largo. Por lo tanto, se considera como vida útil de una estructura, el período de tiempo en el cual, ella conserva los requisitos previsto de seguridad, funcionalidad y estética (aspecto), con costos razonables de mantenimiento.

De acuerdo con el modelo de vida útil desarrollado por Tuutti en 1982 y posteriormente modificado por Helene en 1993 (véase figura II.10), se pueden definir varios conceptos diferentes de vida útil.

### II.4.1. VIDA ÚTIL DEL PROYECTO

La *Vida útil del proyecto* o *Período de iniciación*, está definida como aquel período de tiempo necesario, que ha sido previsto por el diseñador de la estructura, para que un mecanismo de daño (por ejemplo, el frente de carbonatación) o un agente agresor (por ejemplo, el frente de cloruros) de inicio al deterioro del concreto simple o reforzado. Es decir, que la vida útil del proyecto se cumple cuando la barrera de protección del concreto (por ejemplo, productos de protección superficial, la capa de recubrimiento sobre el acero, o ambas), ha sido vencida por el agente agresor, pero aún no se ha iniciado el debilitamiento de la estructura.

### II.4.2. VIDA ÚTIL DE SERVICIO

La *Vida útil de servicio* está definida como el período de tiempo que se inicia desde la ejecución de la estructura hasta que se completa un cierto y determinado nivel aceptable de deterioro. Es decir, que la vida útil de servicio es la suma del período de iniciación y del período de propagación del mecanismo de daño o del agente de deterioro que agrede al concreto o al acero de refuerzo.

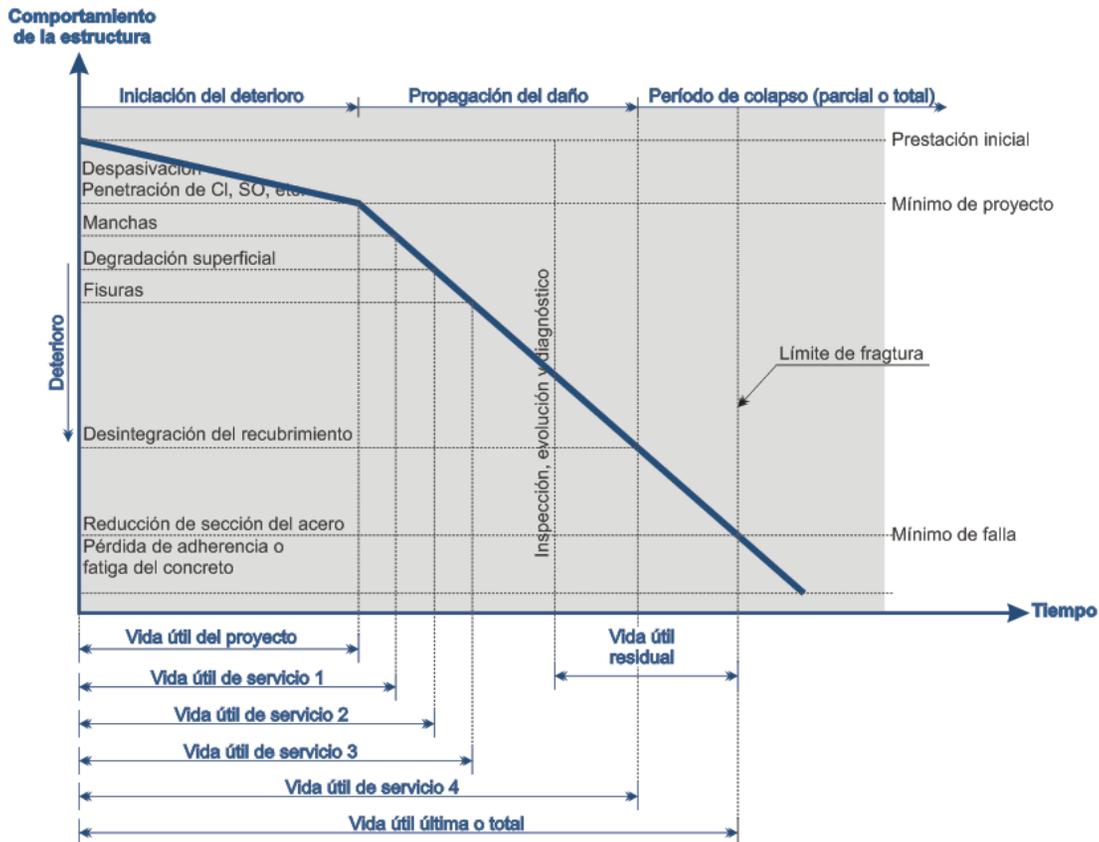


Figura II.10. Relación entre el comportamiento del concreto y el concepto vida útil de la estructura.

En la etapa de *propagación del daño*, usualmente se pueden evidenciar distintos niveles o síntomas de deterioro, tales como: manchas superficiales, desintegración parcial del concreto de recubrimiento (degradación de la pasta superficial), exposición del agregado, fisuras en el concreto de recubrimiento, desprendimiento del recubrimiento, desintegración total del concreto de recubrimiento, u otros.

Por lo anterior, el tiempo de *vida útil de servicio* de cada estructura es muy variable, dependiendo el caso, debido a que cada proyecto tiene un cierto y determinado nivel de aceptación. Por ejemplo, desde el punto de vista estético puede ser inaceptable que una estructura de concreto presente manchas o presencia de hongos, líquenes o bacterias; además, la hermeticidad puede ser definitiva para que no haya humedad o percolación de fluidos en el concreto (por ejemplo, estructuras estancas); también la funcionalidad puede implicar el que no se presenten deflexiones excesivas, fisuras o pérdidas de masa; o finalmente la seguridad demanda que no se rebasen los límites de resistencia previstos bajo las cargas de servicio y las sollicitaciones mecánicas. Para ello en la figura II.10, se observan varios ejemplos de vida útil de servicio.

### II.4.3. VIDA ÚTIL ÚLTIMA O TOTAL

La *Vida útil última o total* o límite de fractura está definida como el período de tiempo que va desde que se inicia la ejecución de la estructura hasta que se presenta su colapso parcial o total. Es decir, que la vida útil total es la suma del período de iniciación del deterioro, del período de propagación del mecanismo de daño o del agente de deterioro que agrede al concreto o al acero de refuerzo, y del período de colapso parcial o total.



En la etapa de colapso, se pueden presentar rupturas o colapsos parciales o el colapso total de la estructura; usualmente corresponde al período de tiempo en el cual puede haber una reducción significativa de la sección neta resistente del acero de refuerzo, una pérdida importante de la adherencia del concreto y el acero, o una disminución importante de la capacidad resistente del concreto (fatiga del material), como consecuencia de la acción de los mecanismos de daño.

#### II.4.4. VIDA ÚTIL RESIDUAL

De acuerdo con Paulo Helene, si durante la vida de servicio de una estructura se realiza una inspección, una evaluación y un diagnóstico (secuencialmente y en corto período de tiempo), a partir de ellos, se puede entonces determinar con alguna aproximación la vida residual de la estructura. Por lo tanto, la *Vida útil residual* corresponde al período de tiempo (cuando a partir de la fecha de la inspección), en que la estructura todavía es capaz de desempeñar sus funciones.

La inspección, la evaluación y el correspondiente diagnóstico, pueden ser efectuados en cualquier momento de la vida en uso de la estructura. Por lo tanto, ellos pueden generar distintas vidas residuales. Es decir, que el plazo final puede ser tanto el límite del proyecto, como el límite de las condiciones de servicio, o el límite de fractura, dándose origen a tres vidas útiles residuales.

Por otra parte, si la estructura es mantenida periódicamente (lavada y protegida) y rehabilitada (resanada, reparada, reforzada o re-protegida), necesariamente se da origen a una nueva vida útil de proyecto, cuya extensión en el tiempo dependerá del tipo de mantenimiento o de rehabilitación efectuados (véase figura II.11).

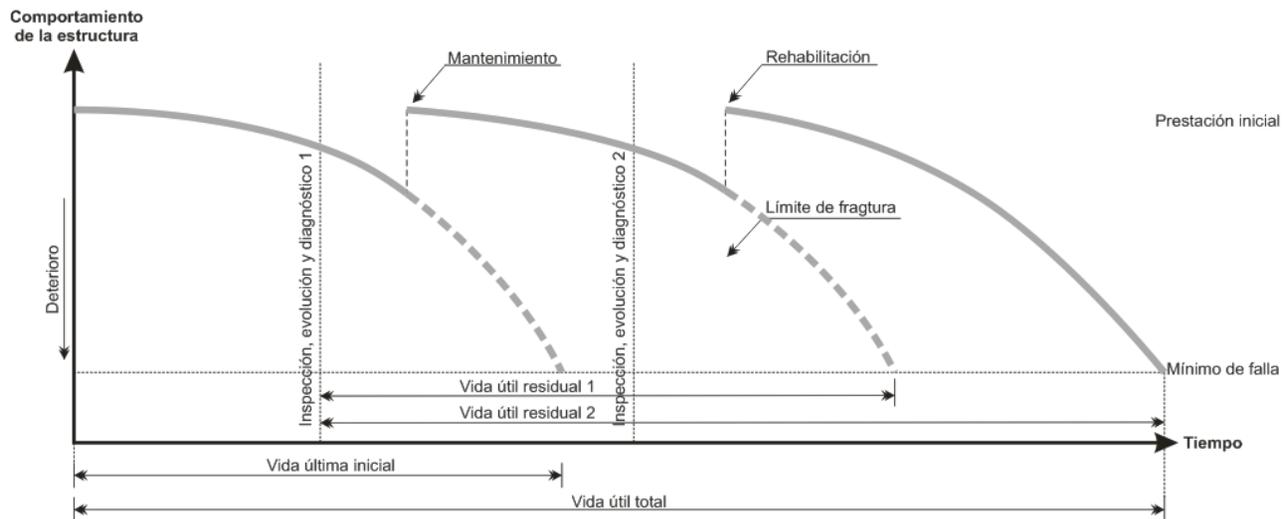


Figura II.11. Relación entre el comportamiento del concreto y el concepto vida útil de la estructura repotenciada mediante mantenimiento y rehabilitación.

#### II.5. AGRESIVIDAD DEL MEDIO AMBIENTE

Las condiciones del medio ambiente que rodea a una estructura de concreto simple o reforzado, tienen una incidencia directa sobre los procesos de deterioro de la misma y para ellos, deben tener en cuenta el macroclima, el clima local y el microclima.

En estructuras expuestas al aire, las condiciones atmosféricas que se encuentran en torno a la estructura (macroclima), tienen una influencia relativamente pequeña sobre la durabilidad del concreto cuando la atmósfera no está enrarecida. Pero cuando hay presencia de aire poluto (smog) y lluvias ácidas, su impacto sobre la durabilidad del concreto puede ser alto.

El clima local, o sea aquel que rodea la estructura hasta pocos metros de distancia; y el microclima, medio ambiente próximo a la superficie de la estructura a escasos milímetros o centímetros, son los que ejercen una influencia decisiva en la durabilidad de los elementos que la componen.

Del mismo modo, las estructuras sumergidas en el suelo (cimientos, muros de contención, etc.) o el agua (pilotes u otras estructuras), pueden verse afectadas en su durabilidad, por contacto superficial o saturado de sustancias agresivas con la pasta de cemento o con el acero de refuerzo.

### **II.5.1. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DEL MEDIO AMBIENTE**

La clasificación de la agresividad del medio ambiente, de acuerdo con las condiciones de exposición de la estructura deben tener en cuenta: el macroclima, el microclima, la durabilidad del concreto y la durabilidad del acero. Para hacer esta clasificación se pueden mencionar las siguientes clases de ambiente:

- **Ambiente ligero o débil.** Hace referencia a ambientes secos como el interior de edificaciones de vivienda, oficinas o comercio (dormitorios, salas, oficinas, almacenes, etc.) y ambientes exteriores rurales donde la humedad relativa es inferior al 60%. Es decir, ambientes en donde el concreto no estará expuesto a ciclos de humedecimiento y secado; a congelación y deshielo; o con presencia de sustancias potencialmente agresivas para el concreto.
- **Ambiente moderado.** Se refiere al interior de edificaciones con ambientes húmedos y cambiantes (humedad relativa entre 60% y 98%), con un riesgo temporal de vapores de agua (baños, cocinas, garaje, lavanderías, etc.) y condensación del agua; estructuras expuestas a ciclos de humedecimiento y secado, estructuras en contacto con agua dulce en movimiento; ambientes rurales lluviosos; ambientes urbanos sin alta condensación de gases agresivos; y estructuras en contacto con suelos ordinarios.
- **Ambiente severo.** Contempla ambientes húmedos con hielo de agua dulce y agentes de deshielo; ambientes marinos o con macroclima industrial y humedad relativa entre 60% y 98%; ambientes urbanos con alta condensación de gases agresivos; y estructuras en contacto con suelos también agresivos.
- **Ambiente muy severo.** Incluye zonas de salpicaduras o sumergidas en agua de mar con una cara expuesta al aire; elementos en aire saturado de sal, ambientes con agua de mar y hielo; exposición directa a líquidos con pequeñas cantidades de ácido, ambientes salinos o aguas fuertemente oxigenadas; gases agresivos o suelos particularmente agresivos; y ambientes industriales muy agresivos.

Para ilustrar lo anteriormente expuesto, en la tabla II.1 se presenta una clasificación de la agresividad del medio ambiente en función de las condiciones de exposición del concreto y en la tabla II.2 se presenta la clasificación de la agresividad del medio ambiente con bases en la durabilidad de la armadura.



Agente agresivo	Agresión del ambiente			
	Ligero	Moderado	Severa	Muy severa
<b>En agua</b>				
Valor del pH	6.5 – 5.5	5.5 – 4.5	4.5 – 4.0	Menor 4.0
CO <sub>2</sub> agresivo mg/l	15 – 30	30 – 60	60 – 100	Mayor 100
Ión amoníaco NH <sub>4</sub> mg/l	15 – 30	30 – 60	60 – 100	Mayor 100
Ión magnesio Mg mg/l	100 – 300	300 – 500	1,500 – 3,000	Mayor 3,000
Ión sulfato SO <sub>4</sub> mg/l	200 – 600	600 – 3,000	3,000 – 6,000	Mayor 6,000
Sólidos disueltos	75 – 150	50 – 75	Menor 50	Menor 50
<b>En suelo</b>				
Grado de acidez según Baumann-Gully	Mayor 20	--	--	--
Ión sulfato SO <sub>4</sub> en suelo seco mg/kg	2,000 – 6,000	6,000 – 12,000	Mayor 12,000	--

**Tabla II.1.** Clasificación de la agresividad del medio ambiente (por ataque químico), en función de las condiciones de exposición del concreto en contacto con agua o suelos que contienen agentes agresivos.

Agresión del medio ambiente	Macroclima	Microclima	Gas carbónico CO <sub>2</sub> en el ambiente	Cloruros Cl <sup>-</sup> en el ambiente
Ligera	Atmósfera rural	Humedad relativa ≤ 60% interiores secos	≤ 0.3%	≤ 200 mg/l
Moderada	Atmósfera urbana	Humedad relativa de 60 a 98% Humedecimiento y secado	≤ 0.3%	< 500 mg/l
Severa	Atmósfera marina o industrial	Humedad relativa de 60 a 98% Congelamiento y deshielo	≥ 0.3%	> 500 mg/l
Muy severa	Polos industriales	Zonas húmedas o industriales y altos agentes agresivos	> 0.3%	> 500 mg/l

**Tabla II.2.** Clasificación de la agresividad del medio ambiente.

Cuando el concreto reforzado es elaborado en condiciones que no favorecen una vida útil larga, los problemas asociados a su durabilidad aumentan. De esta manera se propician los problemas de durabilidad que están asociados a; relación alta agua/cemento (a/c); uso de agua y agregados contaminados con cloruros, sulfatos y otros iones agresivos; mala compactación del concreto, reacciones álcali-sílice de los agregados y un curado inadecuado del concreto. Los problemas relacionados con la durabilidad del concreto ocasionan pérdidas económicas, ya sea por reparación de las áreas afectadas o por la sustitución del elemento que ha fallado.

## II.6. CONCLUSIONES

Debido a que una construcción está sometida a una gran variedad acciones y como consecuencia, ésta responde de muy diversas formas, se hace necesario el estudio de los mecanismos de los daños, por tal motivo surge esta disciplina la «Patología de construcción» la cual, en algunos países ha alcanzado el estatus de ciencia.

La «Patología de construcción» no sólo trata del estudio del origen, mecanismos y las consecuencias de las diversas fallas (lesiones) que pudiera presentar una construcción, sino también de dar una solución ante dichos síntomas y sobre todo prevenir la aparición nuevamente de talas lesiones.

Esta nueva disciplina trata a una construcción como un ente, el cual está en constante cambio debido a todos los factores que interactúan con ésta, y similar al ser humano, puede presentar síntomas de enfermedades, causando daños y lesiones en la misma. Estas enfermedades pueden ser adquiridas durante la vida útil de la construcción, o bien haber nacidos con ellas desde la propia concepción.

La «Patología de construcción» se encarga de diagnósticas estas enfermedades y dar la terapia para la corrección. Por tal motivo la selección de la técnica de corrección y los materiales empleados para la reparación son de fundamental importancia, debido a que están estrechamente relacionados con el aspecto económico.

## CAPÍTULO III

# CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

### III.1. INTRODUCCIÓN

La práctica de estos últimos años ha demostrado frecuentemente que la mejor cimentación de un edificio o la fachada más vistosa en una obra carecen de valor si no se ha tenido en cuenta en ellos las cuestiones inherentes de la construcción en su conjunto. No sólo pueden resultar inadecuadas funcionalmente, sino en casos más graves pueden ser solicitadas hasta llegar a su destrucción. Aunque, felizmente, rara vez se llega a tal extremo, existen casos, sin embargo, en que la defectuosa calidad da lugar a circunstancias antihigiénicas para el hombre, elevadas pérdidas de energía opuestas a la economía, altos precios de coste y costosas averías y desperfectos en las construcciones, así como interrupciones en la producción.

La industrialización de la construcción no ha disminuido esos efectos, antes bien lo ha intensificado. Debe hacerse constar que precisamente las construcciones más modernas que seducen la vista con la audacia de sus fachadas acristaladas son las peores desde el punto de vista físico. Con frecuencia requieren el auxilio, difícilmente justificable económicamente, de costosas instalaciones técnicas, sin las que no serían utilizables.

Los edificios nuevos no se pueden juzgar solamente recién terminados. Muy a menudo, después de tres años, su aspecto ha cambiado completamente y podemos ver en que forma y donde el tiempo transcurrido ha debajo su huella. A veces los edificios ya lo acusan incluso antes de tres años; al ser ocupados el edificio, los nuevos moradores entran acompañados de los operarios encargados de efectuar las reparaciones. Naturalmente, estos desperfectos pueden ser debido a una mala ejecución. Pero, muy frecuentemente, los defectos son debido a un mal proyecto y que son para los edificios como enfermedades heredadas desde el momento de nacer.

Una falta de metodología en el trabajo es fundamentalmente el motivo de estos defectos constructivos.

El progreso y la aparición de nuevos materiales ha hecho que estos se coloquen en sustitución de los tradicionales y, por tanto, de una manera equivocada; otra veces ocurre que los materiales tradicionales se colocan en nuevas formas de modo no adecuado a sus características.

El conocimiento de las características físicas de los principales materiales de construcción y aislamiento para el técnico en construcción son tan imprescindibles como el dominio de los cálculos teóricos estáticos.

Hay ciertas propiedades de los materiales que interesan porque afectan las propiedades físicas de la construcción; estas propiedades muy a menudo se omiten. Entre ellas, las más importantes son:

- Resistencia del material ante diversas cargas.
- Propiedades aislantes de conductividad o de inercia térmica.
- Velocidad de absorción de la humedad.



- Capacidad para la rápida disipación de la humedad y de secado.
- Alterabilidad de forma y volumen ante los cambios de temperatura y humedad.
- Facilidad a la corrosión o pérdida de las propiedades.
- Propiedades electrolíticas en metales.
- Envejecimiento por el paso del tiempo y por las inclemencias atmosféricas.

El comportamiento de los materiales debido a estas circunstancias no depende del material en sí, sino también de su estructura interna.

### III.2. CONCRETO

El concreto es el material que con mayor frecuencia se utiliza en la construcción de múltiples y diversas edificaciones, tanto en nuestro país como en el resto del mundo. Dadas las características, este material es especial ya que ofrece la oportunidad de cambiar sus propiedades, de ahí la importancia de aprender todo lo posible sobre el concreto.

La característica más importante del concreto es su alta capacidad a la compresión, y no a la tensión. Sin embargo, esta deficiencia se corrige con la introducción de un material que absorbe las tensiones, como el acero de refuerzo, cuya combinación produce un material óptimo para la construcción de elementos estructurales que se llama concreto reforzado.

Una de las situaciones por la que amerita estudios más detallados es que la mayoría de la gente que tiene que ver con el concreto no está debidamente informada sobre él, es decir, se desconoce que la calidad del concreto puede afectarse durante el proceso de su fabricación, esto es, en el mezclado, colocación, curado, transporte , etc.

El «**concreto**» es una mezcla de varios materiales; cemento, agregados finos (arena), agregados gruesos (grava) y agua.

Los elementos que componen el concreto se dividen en dos grupos: activos e inertes. Los elementos activos son el agua y el cemento, ya que al unirse provocan una reacción química que produce el fraguado, la cual no es más que un proceso de endurecimiento de la mezcla hasta llegar a la solidez. Los elementos inertes (arena y grava) cuyo papel fundamental es formar el “esqueleto” del concreto, ocupando gran parte del volumen del producto final, con lo cual se logra obtener un producto más económico y disminuir notablemente los efectos de la reacción química del fraguado: la elevación de la temperatura y la contracción.

Las proporciones en que se mezclan los distintos componentes varían de acuerdo con la granulometría de los agregados y con la resistencia final deseada. El agua que entra en combinación química con el cemento es aproximadamente un 33% de la cantidad total y esa fracción disminuye con la resistencia del concreto. La mayor parte de esta agua de mezclado se destina a lograr la fluidez y trabajabilidad de la mezcla, coadyuvando a la “contracción del fraguado” y dejando en su lugar los vacíos (poros) correspondientes cuya presencia influye negativamente en la resistencia final del concreto.

Para adentrarnos un poco más en el conocimiento de lo que es este material, veamos las características de sus componentes.

### III.2.1. CEMENTO

La palabra cemento es nombre de varias sustancias, las cuales tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para pegar, pero para efectos de construcción, el significado del término «**cemento**» se restringe a aquel material que sirve para unir los agregados, el cual experimenta una reacción química con el agua, fraguando y endureciendo. A este tipo de cementante también se le conoce como «**cemento hidráulico**» debido a la reacción química que produce al mezclarse con agua.

El cemento se obtiene a partir de la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos, así como de otros que contengan sílice, alúmina y óxidos de hierro. En general los cementos pueden clasificarse como cementos naturales, cementos portland y cementos de alta alumina.

El cemento portland es el cemento de más uso, este cemento debe su nombre a la semejanza en color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra Pórtland (una caliza obtenida de una cantera de Dorset, Inglaterra). El cemento portland se define como el material que se obtiene de la mezcla minuciosa de materiales calcáreos y arcillosos y otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, quemándolos a una temperatura de formación del clinker, y mezclado el clinker resultante con yeso. De acuerdo con la definición que aparece en la Norma Oficial Mexicana (NOM), el cemento portland es el que proviene de la pulverización del clinker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contenga óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como de otros materiales que no excedan el 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento, como pudieran ser los álcalis.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1,400°C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente formando bolas conocidas como clinker que, cuando se enfría el material, se tritura hasta obtener un polvo fino al que se le añade un poco de yeso para obtenerse como producto final, el cemento portland, el que es usado en todo el mundo en la actualidad.

Hasta nuestros días este material se ha convertido en un elemento primordial en la construcción de edificaciones de diversa índole, propiciando grandes obras que, a lo largo y ancho del mundo, podemos observar.

En la tabla III.1 y III.2 se muestra las tablas de clasificación de acuerdo al cemento por sus adiciones, por sus características especiales y por su clase de resistencia, que clasifican al cemento de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 que se encuentra actualmente en vigor.

Tipo	Denominación	Principales usos
CPO	Cemento Portland Ordinario	Estructuras convencionales en medio poco agresivos: losas, columnas, pisos, trabes, etc.
CPP	Cemento Portland Puzolánico	Obras de concreto en masa y armado. Pavimentos y cimentaciones. Morteros en general. Obras en la que se requiere impermeabilidad.
CPEG	Cemento Portland de Escoria de Alto Horno	Obras de concreto en masa, incluso de gran volumen que requieren un bajo calor de hidratación, estabilización de suelos, obras marítimas.
CPC	Cemento Portland Compuesto	En todas las situaciones de los tipos anteriores (CPEG y CPP), ya que sus propiedades y comportamiento se pueden considerar como una ponderada de estos dos.
CPS	Cemento Portland de Humo de Sílice	Obras de concreto en masa y armado. Pavimentaciones, cimentaciones y obras donde se requiera impermeabilidad a condición de que la dosificación sea la adecuada.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	Obras de concreto en masa de gran volumen que requieren bajo calor de hidratación. Recomendados en ambientes húmedos y agresivos por salinidad (zonas litorales) o por sulfatos de aguas o terrenos. Obras subterráneas y marítimas.

**Tabla III.1.** Clasificación del cemento por sus adiciones.



Tipo	Denominación	Usos
RS	Resistente a los Sulfatos	Concretos en contacto con terrenos yesíferos o que contiene otros sulfatos y concreto en contacto con aguas marinas o en ambientes marítimos.
BRA	Baja Reactividad Alkali-Agregado	Obras de concreto en masa, con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis.
BCH	Bajo Calor de Hidratación	Obras masivas de concreto susceptible de experimentar fuertes retracciones térmicas con peligro de fisuración y agrietamiento.
B	Blanco	Para concretos con fines arquitectónicos y decorativos.

Tabla III.2. Clasificación por características especiales.

Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo a 28 días
20	—	20	40
30	—	30	50
30 R	20	30	50
40	—	40	—
40 R	30	40	—

La letra R indica que es un cemento de resistencia inicial alta, las unidades de reporte se modificaron N/mm<sup>2</sup>, en vez de kg/cm<sup>2</sup> (1 N/mm<sup>2</sup> = 10.2 kg/cm<sup>2</sup>).

Tabla III.3. Clasificación por su clase resistente.

Así tenemos, por ejemplo, que la nomenclatura que se utiliza en los cementos portland ahora es la siguiente:

- CPC 30R. Es un cemento portland compuesto de clase resistente 30, de resistencia inicial alta.
- CPP 30R. Es un cemento portland pozolanico de clase resistente 30, de resistencia inicial alta.
- CPO 30R RS. Es un cemento portland ordinario de clase resistente 30, de resistencia inicial alta y con la característica especial de resistente a los sulfatos.
- CPP 30R RS/BRA. Es un cemento portland puzolanico de clase resistente 30, de resistencia inicial alta y con las características especiales de resistente a los sulfatos y baja reactividad álcali-agregado.

### III.2.1.1. Composición química del cemento Portland

Hemos visto que las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento portland consisten principalmente en cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar.

Se suele considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento; se enumeran en la tabla III.4, junto con sus símbolos de abreviación. Esta notación abreviada, utilizadas por los químicos del cemento, describe cada óxido con una letra, de la forma siguiente: CaO = C; SiO<sub>2</sub> = S; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A; y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F. Análogamente el H<sub>2</sub>O del cemento se indica por una H.

Nombre	Composición de óxido	Abreviatura	Porcentaje de la composición para cemento normal
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	54.1
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	16.6
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	10.8
Aluminoferrito tetracálcico	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	9.1
Compuestos menores	—	—	9.4

Tabla III.4. Compuestos principales del cemento portland.

Los dos silicatos de calcio son los principales componentes del cemento, y el comportamiento físico del cemento durante la hidratación es semejante al de ambos compuestos por separado.

La hidratación del  $C_3S$  no se desarrolla a una velocidad constante. La rápida liberación inicial de hidróxido de calcio dentro de la solución deja una cara exterior de hidrato de silicato de calcio de aproximadamente  $0.01 \mu\text{m}$  de espesor. A esto se sigue el llamado período latente durante el cual se lleva a cabo muy poca hidratación debido a la depositación de una capa de los granos de cemento no hidratados. Posteriormente la capa se rompe a causa de la presión de los productos de hidratación, y esto último acelera de nuevo la hidratación. Finalmente hay una nueva disminución cuando la difusión a través de los poros en los productos de hidratación llega a ser el factor de control.

La reacción del  $C_3A$  puro con agua es muy violenta y lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, conocido como fraguado relámpago. Para evitar esto, se agrega yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) al clinker del cemento. El yeso y el  $C_3A$  reaccionan para formar un sulfoaluminato insoluble de calcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ).

No se recomienda la presencia de  $C_3A$  en el cemento, pues casi no contribuye a reforzarlo, excepto en edades muy tempranas, y cuando los sulfatos atacan la pasta de cemento endurecida, pueden favorecer el rompimiento debido a la expansión motivada por la formación de sulfoaluminato de calcio a partir de  $C_3A$  de la pasta endurecida. Sin embargo, el  $C_3A$  actúa como fundente y, de este modo, reduce la temperatura de cocción del clinker y facilita la combinación de cal y sílice; por esta razón el  $C_3A$  es útil en la fabricación del cemento.

El  $C_4AF$  también actúa como fundente. Se podría observar que, si no se formará algo de líquido durante la cocción, las reacciones en el horno avanzarían en forma mucho más lenta y, probablemente, sería incompleta. El yeso no sólo reacciona con el  $C_3A$ , pues con el  $C_4AF$  forma sulfoferrito cálcico, al igual que el sulfoaluminato cálcico, su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos.

Además de los componentes principales citados en la tabla III.4, existen algunos componentes menores como  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ , que generalmente no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento. Dos de los componentes mencionados revisten interés: los óxidos de sodio y potasio,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , conocidos como álcalis (aunque en el cemento también existen otros álcalis). Se ha encontrado que estos componentes reaccionan con algunos agregados y que los productos de esa reacción ocasionan una desintegración del concreto, además de afectar la rapidez con que el cemento adquiere resistencia. Debido a esto se debe destacar que el término "componentes menores" se refiere principalmente a la cantidad, pero no necesariamente a su importancia.

Las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuestos varían de manera considerable de un cemento a otro y realmente es posible obtener diferentes tipos de cemento agregando en forma proporcional los materiales correspondientes. A continuación se mencionan los diferentes tipos de cementos y la variación de sus principales compuestos para la obtención de cada uno de ellos.

### **III.2.1.2. Cemento Portland ordinario**

El cemento portland ordinario es el cemento de más uso, este cemento es excelente para construcciones de concreto en general, las cuales no están expuestas a sulfatos del suelo o del agua freática.



Las proporciones químicas de sus principales componentes se mencionan en la tabla III.4. Otro requisito sobre la composición química del cemento portland ordinario es que el contenido de magnesio no debe exceder de un 4%.

### III.2.1.3. Cemento Portland de resistencia inicial alta

Este cemento es similar al cemento portland ordinario. El cemento portland de resistencia inicial alta, como su nombre indica, desarrolla su resistencia más rápidamente. La rapidez de endurecimiento no debe confundirse con la rapidez de fraguado: de hecho, los dos cementos tiene tiempo de fraguado parecidos.

Esta mayor rapidez de adquisición de resistencia del cemento de resistencia inicial alta se debe a un contenido más elevado de  $C_3S$  en ocasiones de más del 70%, y a una molienda más fina del clinker del cemento. La mínima finura que se específica es de  $325 \text{ m}^2/\text{kg}$ , pero como regla se encuentran finuras mayores.

El cemento de resistencia inicial alta se usa en sustitución al cemento portland ordinario cuando se desea optimizar en los tiempos de construcción o para trabajos urgentes, debido a que su resistencia adquirida a los tres días es del mismo orden que la resistencia del cemento portland ordinario a los siete días con las misma relación agua/cemento.

El cemento portland de resistencia inicial alta se debe evitar para construcciones masivas o en secciones estructurales grandes, ya que el rápido incremento de resistencia libera una mayor cantidad de calor de hidratación.

### III.2.1.4. Cemento resistente a los sulfatos

En el cemento endurecido, el hidrato de aluminio de calcio puede reaccionar con alguna sal de sulfato que venga de fuera del concreto: el producto de la adición es un sulfoaluminato de calcio, que se forma dentro de la pasta de cemento hidratado. Ya que el incremento de volumen de la fase sólida es del 227%, sobreviene una desintegración gradual del concreto. Un segundo tipo de reacción se produce al intercambiar bases entre el hidróxido de calcio y los sulfatos, que dan como resultado la formación de yeso con un incremento de volumen en la fase sólida del 124%. Estas reacciones se conocen como «ataque de sulfatos».

Las sales particularmente activas son el sulfato de sodio y de magnesio. El ataque de los sulfatos se acelera si va acompañado por una sucesión de estados recíprocos mojados y secos, como en el caso de una estructura marina.

El remedio consiste en usar cemento de bajo contenido de  $C_3A$ . La Norma ASTM, específica un límite en el contenido de  $C_3A$  al 5% y también restringe la suma del contenido total de  $C_4AF$  a más del doble del contenido de  $C_3A$ . El contenido de óxido de magnesio está limitado a un 6%.

El cemento resistente a sulfatos se recomienda para cimentaciones expuestas a la acción de aguas sulfatadas y agresivas al concreto.

El calor desarrollado por el cemento resistente a los sulfatos no es mucho mayor que el del cemento portland ordinario. Por tanto, parecería que el cemento resistente a sulfatos debería ser, teóricamente, un cemento ideal, pero debido a los requisitos especiales para la composición de la materia prima necesaria para su elaboración, el cemento resistente a los sulfatos no puede fabricarse de manera económica.

### **III.2.1.5. Cemento Portland con escoria granulada de alto horno**

Este tipo de cemento se elabora al moler juntos el clinker del cemento portland y escoria granulada de alto horno, sin que la proporción de esta última exceda del 65% del peso de la mezcla.

La escoria de alto horno es un producto de desecho de la fabricación de hierro en lingotes, donde se obtiene cantidades hierro y escoria del mismo orden. La escoria de alto horno es una mezcla de cal, sílice y alúmina, o sea, los mismos compuestos óxidos que componen el cemento portland, pero en distintas proporciones. Aunque no se puede dar su gama de valores, podemos observar que algunas escorias satisfactorias tiene la siguiente composición: 42% de cal; 30% de sílice; 19% de alúmina; 5% de óxido de magnesio; y 1% de álcalis.

El calor de hidratación del cemento portland con escoria granulada de alto horno es más bajo que el cemento portland ordinario, así que el primero se puede usar en estructuras de concreto masivo. Debido a su alta resistencia a los sulfatos, siendo el contenido  $C_3A$  bajo, el cemento portland con escoria granulada de alto horno se usa frecuentemente en construcciones marinas.

### **III.2.1.6. Cemento Portland puzolanico**

El cemento portland puzolanico es una mezcla entre el cemento portland ordinario y puzolanas. La puzolana se limita entre un 15 y 40% del peso del cemento portland puzolanico.

La puzolana es un material natural o artificial que contiene sílice o silicoaluminoso, el cual tiene poco o nulo cementante, pero en forma muy dividida y en presencia de humedad reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar un compuesto con propiedades cementantes. Es esencial que la puzolana este finamente dividida, a fin de que los sílice puedan combinarse con la cal (liberada por la hidratación del cemento portland) en presencia de agua, para formar silicatos de calcio estable con propiedades cementantes.

Los materiales puzolanicos que frecuentemente encontramos son: ceniza volcánica (puzolana original), pumicita, esquistos de opalina, tierras diatomáceas calcinadas, arcilla quemada, ceniza volante, etc.

Por lo general, el cemento portland puzolanico adquiere resistencia con mucha lentitud y necesita, por lo tanto, un período de curado mayor, pero su resistencia última es aproximadamente la misma que la del cemento portland ordinario.

Las puzolanas son a menudo más baratas que el cemento portland que reemplazan, pero su ventaja principal estriba en la hidratación lenta y, por lo tanto, en su bajo calor de hidratación, esto reviste gran importancia en construcciones de estructuras de concreto masivo, que es en estos casos donde más se usa el cemento portland puzolanico. El cemento portland puzolanico muestra también una buena resistencia al ataque de sulfatos y algunos agentes destructivos.



### III.2.1.7. Cemento de baja reactividad álcali-agregado

La reacción álcali-agregado se identifica como un proceso físico-químico en el cual intervienen principalmente los minerales que constituyen la roca utilizada como agregado, según sea su naturaleza cristalina o amorfa y los hidróxidos alcalinos del concreto que pueden ser aportados, bien por el cemento, por los mismos agregados o por algún agente externo.

Varios tipos de interacciones pueden ocurrir en cada clase y no todas son necesariamente expansivas o nocivas, identificándose tres diferentes tipos de reacción: álcali-carbonato, álcali-silicato y álcali-sílice.

De las tres reacciones que se producen se ha identificado que las reacciones álcali-carbonato y álcali-silicato están relacionadas con los agregados que se utilizar en la elaboración del concreto. No así, la reacción álcali-sílice que de acuerdo con las investigaciones realizadas tiene su origen en la materia prima utilizada en la fabricación del cemento. Usualmente la fracción arcillosa utilizada como materia prima contiene mica o arcilla ilítica, entonces el clinker producido esta enriquecido en potasio, mientras que si está presente el feldespato degradado, el clinker puede contener más sodio o potasio o ambos, dependiendo de la composición del feldespato en la materia prima.

Con objeto de contabilizar la cantidad de álcalis presentes en el cemento se ha generalizado en la práctica el expresar el contenido álcalis en términos de sodio equivalente, correlacionando los óxidos de sodio y potasio en términos de proporciones moleculares. El cálculo a seguir se hace con la relación matemática siguiente:

$$\text{Sodio equivalente} = \text{Na}_2\text{O} + 0.653 \text{ K}_2\text{O} \text{ relación en peso}$$

El valor máximo permitido del sodio equivalente se restringe a 0.6% en peso, para que la reacción álcali-sílice no se pueda llevar a cabo. Del mismo modo, la masa de álcalis provenientes de otras fuentes no debe ser mayor de  $3.0 \text{ kg/m}^3$  en la elaboración del concreto. De este forma se inhibe la reacción álcali-agregado.

### III.2.1.8. Cemento blanco

El cemento portland blanco está hecho de materias primas que contienen una pequeña cantidad de óxido ferroso de manganeso. Suele usarse arcilla blanca o de china junto con una caliza, libre de impurezas. Puesto que el fierro actúa como fundente en la obtención del clinker, su ausencia plantea la necesidad de mayores temperaturas, pero algunas veces se utiliza criolita como fundente (fluoruro de aluminio sódico). Como combustible se usa petróleo para evitar la contaminación por la ceniza del carbón.

El costo de la molienda es alto y esto, aunado al costo de la materia prima más cara, hace que el cemento blanco también sea caro. Por esta razón, el concreto con cemento blanco se usa a menudo para acabados superficiales.

La composición característica del cemento portland blanco esta dada de la siguiente forma:  $\text{C}_3\text{S} = 51\%$ ;  $\text{C}_2\text{S} = 26\%$ ;  $\text{C}_3\text{A} = 11\%$ ;  $\text{C}_4\text{AF} = 1\%$ ;  $\text{SO}_3 = 2.6\%$ ; Álcalis = 0.25%; y compuestos menores = 8.15%. Sin embargo, los contenidos de  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$  pueden variar mucho.

### **III.2.1.9. Cemento con escoria granulada de alto horno**

El cemento con escoria granulada de alto horno, no es un cemento portland. Este cemento se fabrica al combinar una mezcla del 80 al 85% de escoria de hierro granulada con un 10 al 15% de sulfato de calcio (en forma de yeso completamente calcinado o anhidrita) y alrededor de 5% de escoria de cemento portland.

El cemento con escoria granulada de alto horno es muy resistente al agua de mar y puede soportar mayores concentraciones de sulfatos de las que normalmente se encuentran en el agua, además es resistente a la descomposición de compuestos orgánicos y derivados del petróleo. Por estas razones el cemento de escoria granulada de alto horno se recomienda para la construcción de estructuras en suelos contaminados.

El calor de hidratación del cemento de escoria granulada de alto horno es bajo, el cemento es, por lo tanto, adecuado para construcciones de estructuras de concreto masivo. La velocidad de aumento de resistencia del cemento de escoria granulada de alto horno se incrementa con temperaturas menores de 50°C, pero con temperaturas superiores se ha observado un comportamiento anormal. Por esta razón el curado con vapor arriba de los 50 °C no debe usarse. Conviene hacer notar que el cemento de escoria granulada de alto horno no debe ser mezclado con otros cementos portland debida a que la cal liberada por la hidratación por los otros cementos interfiere en la reacción entre la escoria y el sulfato de calcio.

### **III.2.2. AGREGADOS**

Estos agregados, denominados agregados inertes finos y gruesos, son del tipo mineral y ocupan aproximadamente entre el 70 y 75% del volumen total de la mezcla de concreto. Su objetivo principal es lograr una disminución en la cantidad de cemento a utilizar, lo cual da como resultado una mezcla más económica, ya que estos materiales son más baratos.

Además, dado el volumen que ocupan en la mezcla, conocer sus características y calidad es de suma importancia. Por ejemplo, si se utiliza un agregado con mayor densidad, el concreto tendrá una mayor solidez, la resistencia a la intemperie será mejor y éste le dará una estabilidad volumétrica al concreto.

Los agregados minerales utilizados en la mezcla se clasifican en finos y en gruesos. Un agregado fino o arena es aquel material que pasa por el tamiz No. 4 (abertura de 4.76 mm). El material más grueso que éste se clasifica como agregado grueso o grava.

En general, el tamaño de los agregados utilizados en el concreto varían desde algunos centímetros hasta partículas más pequeñas de décimas de milímetro. Sin embargo el tamaño máximo del agregado queda limitado a lo siguiente:

- A la quinta parte de la separación mínima entre los lados de la cimbra,
- La tercera parte del peralte de la losa, y
- Dos tercios de la separación libre entre varillas de refuerzo.

Sin embargo, se recomienda para la fabricación de un buen concreto incluir agregados con una distribución granulométrica variada, con un tamaño mayor de 5 mm para la arena y menor que 5 cm para la grava. También se estipula que los agregados finos deben ser químicamente inertes, libres de cualquier recubrimiento, debe ser satisfactorios en términos físicos, es decir en cuanto a dureza, adsorción, propiedades térmicas y elásticas, mientras



que para los agregados gruesos deben ser petrográficamente aceptables en cuanto a dureza y tenacidad, deben ser químicamente inertes, libres de cualquier recubrimiento, tener forma apropiadas, deber ser satisfactorios en términos físicos como en densidad y adsorción.

Los agregados en general son de materiales naturales, pero estos pueden fabricarse como productos industriales que, en términos generales, pueden ser más ligeros o más pesados. La grava se compone de guijarros de diversos tamaños que suelen encontrarse en depósitos. Proviene de rocas duras, por lo que sus propiedades dependen de la roca original. Por otro lado las arenas provienen de la desintegración de rocas por la acción del tiempo o por intemperismo.

Está claro que la resistencia a la compresión del concreto no puede ser mayor que la de los agregados, aunque no es fácil establecer cual es la resistencia de las partículas individuales.

El peso específico del concreto con agregado de piedras naturales, varía aproximadamente de  $2,200 \text{ kg/m}^3$  a  $2,500 \text{ kg/m}^3$ . Mediante la utilización de agregados livianos y pesados en la elaboración del concreto se crean los llamados concretos livianos y pesados. Estos concretos tienen un peso específico muy variados, que van desde  $800 \text{ kg/m}^3$  a  $1,900 \text{ kg/m}^3$  para los llamados concretos livianos y  $3,200 \text{ kg/m}^3$  a  $5,300 \text{ kg/m}^3$  para los llamados concretos pesados

### III.2.3. CALIDAD DEL AGUA

Puede usarse como agua de mezclado y/o curado del concreto, aquella que no tenga un pronunciado olor o sabor, que esté limpia o libre de aceites, cítrico, sales, ácidos, azúcares, materia orgánica y/o cualquier otra sustancia perjudicial a la estructura terminada. Para ello el agua, debe cumplir con las siguientes tolerancias de concentraciones máximas de impurezas, que se muestran en la tabla III.5.

Impurezas	Máxima concentración tolerada
Carbonato de sodio o potasio	1,000 ppm
Cloruro de sodio	20,000 ppm
Cloruro como Cl (concreto pre-esforzado)	500 ppm
Cloruro como Cl (concreto húmedo o con elementos de aluminio, metales similares o galvanizados)	1,000 ppm
Sulfato de sodio	10,000 ppm
Sulfato como $\text{SO}_4$	1,000 ppm
Carbonatos de Ca y Mg como ión bicarbonato	400 ppm
Cloruro de magnesio	40,000 ppm
Sulfato de magnesio	25,000 ppm
Cloruro de calcio (por peso de cemento)	2%
Sales de hierro	40,000 ppm
Yodato, fosfato, arsenato y borato de sodio	500 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm
Ácido sulfúrico y ácido clorhídrico	10,000 ppm
pH	6.0 a 8.0
Hidróxido de sodio (por peso de cemento)	0.5%
Hidróxido de potasio (por peso de cemento)	1.2%
Azúcar	500 ppm
Partículas en suspensión	2,000 ppm
Aceite mineral (por peso de cemento)	2%
Agua con algas	No recomendable
Materia orgánica	20 ppm
Agua de mar (concentración total de la sales para concreto no reforzado)	35,000 ppm
Agua de mar para concreto reforzado o pre-esforzado	No recomendable

Tabla III.5. Tolerancias de concentraciones de impurezas en el agua de mezclado.

### III.2.4. ADITIVOS

Es común que, en lugar de usar un cemento especial para atender un caso particular, a éste se le pueda cambiar algunas de sus propiedades agregándole un elemento llamado aditivo. Un aditivo es un material que se agrega antes, después o durante la realización de la mezcla con el propósito de mejorar las propiedades del concreto, tales como resistencia, manejabilidad, fraguado, durabilidad, etc.

En la actualidad, se hallan disponibles en el mercado numerosos productos y los hay en estado líquido, en polvo y sólidos. Aunque sus efectos están descritos por los fabricantes, cada uno de ellos deberá verificarse cuidadosamente antes de usarse.

Los aditivos se clasifican de acuerdo con el fin con que se van a usar en el concreto. Los aditivos más comúnmente empleados son:

- Inclusiones de aire.
- Fluidizantes.
- Retardantes del fraguado.
- Acelerantes de la resistencia.
- Estabilizadores de volumen.
- Endurecedores.
- Impermeabilizantes.

#### III.2.4.1. Cloruro de calcio

La adición de cloruro de calcio (CaCl) sirve como acelerante de la resistencia del concreto a edades tempranas. Este tipo de aditivos se recomienda para hacer trabajos de reparación muy urgentes o cuando se necesite colocar concreto a bajas temperaturas.

El cloruro de calcio aumenta la liberación de calor durante las primeras horas, funcionando como catalizador en la reacción de hidratación.

Por otro lado, se debe evitar el uso del cloruro de calcio cuando se use para la elaboración del concreto con cemento de alta alúmina. Así mismo, la cantidad de aditivo se debe restringir a la cantidad mínima, ya que de lo contrario esto provocará una aceleración en la resistencia incluso puede llegar a un fraguado relámpago.

Cuando existe riesgo de reducir la durabilidad del concreto por agentes externos, no se aconseja el empleo de cloruro de calcio. Por ejemplo, la resistencia del concreto a ataques de sulfatos se reduce al añadir CaCl a la mezcla, especialmente en mezclas pobres, y aumenta el riesgo de una reacción alcalina del agregado. Otro inconveniente es que eleva la contracción por secado cerca de un 10 a 15%. El cloruro de calcio no debe usarse en concreto que se encuentre en contacto con acero de refuerzo. El curado con vapor del concreto reforzado y con cloruro de calcio lleva el riesgo de una severa corrosión.



La acción de cloruro de sodio (NaCl) es similar a la del cloruro de calcio pero en menor intensidad. Mientras que el cloruro de bario (BaCl) solo tiene efecto de acelerante en el concreto en condiciones calientes.

#### III.2.4.2. Aditivos retardantes

Estos aditivos hacen más lento el endurecimiento de la pasta, por lo tanto afectan su resistencia a edades tempranas. Esto puede disminuir la resistencia inicial. Los aditivos retardantes no alteran la composición o identidad de los productos de la hidratación.

Los aditivos retardantes son útiles para el concreto en climas cálidos, para grandes volúmenes o tiempos largos de transportación.

Entre las sustancias que tiene acción retardante se encuentran el azúcar, los derivados de carbohidratos, las sales de zinc solubles y boratos solubles. Es necesario tener gran cuidado en el empleo de retardantes, ya que si se colocan en cantidades incorrectas, pueden evitar el fraguado y el endurecimiento del concreto. Por ejemplo, experimentos realizados ha demostrado que si se usa una pequeña cantidad de azúcar en forma cuidadosamente controlada (aproximadamente 0.05% del peso del cemento) está actuará como retardante aceptable, el retraso en el fraguado del concreto es de aproximadamente 4 horas. Gran cantidad de azúcar, digamos 0.2 a 1% del peso del cemento, evitará virtualmente el fraguado de este último.

#### III.2.4.3. Aditivos reductores de agua

El principal componente activo de estos aditivos son los agentes superficiales activos. Las sustancias se integran a las partículas de cemento dándoles una carga negativa, lo que produce una repulsión entre las partículas que estabilizan la dispersión: además, esa carga causa la formación de una película de moléculas orientadas de agua alrededor de cada partícula, lo que impide el acercamiento estrecho entre ellas. Por lo tanto, las partículas tienen más movilidad y el agua liberada de las restricciones del sistema floculado lubrica la mezcla, aumentando así su trabajabilidad.

La reducción de la cantidad de agua de mezclado que se obtiene gracias a los aditivos, varía entre el 5 y el 15%. En muchos casos, la reducción de debe en parte al aire incluido por el aditivo. La disminución real del agua del mezclado depende del contenido del cemento, del tipo de agregado utilizado, de la presencia de agentes inclusores de agua. Por lo tanto se manifiesta la necesidad de hacer pruebas con el mismo tipo de materiales que se van a utilizar en la construcción, para determinar el tipo y la cantidad de aditivo que permita alcanzar óptimas propiedades. Sin embargo, un aspecto a considerar es la segregación del concreto que pueden producirse al agregarle estos aditivos.

La cantidad de aditivo generalmente representa sólo una fracción del 1% del peso del cemento en la mezcla, de modo que es esencial se respete esta cantidad.

#### III.2.4.4. Aditivos impermeabilizantes

Los aditivos impermeabilizantes son elaborados a base de estearato de calcio, estearato de butilo y oleato de calcio, los cuales repelen el agua por una carga electrostática que se produce al reaccionar los iones de calcio en las paredes de los capilares de la pasta de cemento hidratada.



#### III.2.4.5. Aditivos inclusores de aire

Este es un tipo de aditivo que se usa principalmente para incrementar la resistencia del concreto al congelamiento y derretimiento, y proporcionan mejor resistencia al deterioro causado por las sales descongelantes. Los agentes inclurores de aire ocasionan la formación de espuma en el agua de mezclado resultando millones de burbujas de aire estrechamente separadas que se incorporan en el concreto. Cuando el concreto se congela, el agua penetra en las burbujas, aliviando la presión sobre el concreto. Cuando el concreto se descongela, el agua puede salir de las burbujas gracias a la cual da se da un menor agrietamiento al que se hubiera dado sin usar el aire atrapado.

### III.3. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

#### III.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

Puesto que el concreto se utiliza principalmente en compresión, resulta de interés fundamental su curva esfuerzo-deformación unitaria a la compresión.

La resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) se determina por medio de pruebas a la falla de cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura de 28 días de edad a una velocidad especificada de carga.

La figura III.1 presenta los resultados obtenidos de pruebas de compresión en cilindros de concretos de densidad normal, de resistencia variable y de 28 días de edad, obtenidos a partir de ensayos a compresión uniaxial.

Todas las curvas tienen características similares. Constan de una porción inicial relativamente elástica y lineal en la cual el esfuerzo y la deformación unitaria son proporcionales y puede considerarse así, sin error, hasta valores de esfuerzo de  $0.45 f'_c$ , correspondientes al rango usado en la teoría elástica, luego comienza a inclinarse hacia la horizontal hasta alcanzar el esfuerzo máximo, o sea la resistencia a la compresión, al llegar a una deformación unitaria de aproximadamente 0.002 para concreto de densidad normal.

Todas las curvas muestran un tramo descendente después de que se alcanza el esfuerzo máximo; sin embargo, las características después del esfuerzo máximo dependen en alto grado del método de ensayo. Si se siguen procedimientos especiales en el ensayo para asegurar una tasa de deformación constante mientras que la resistencia de cilindro disminuye, puede obtenerse largos tramos descendientes y estables alcanzando una deformación unitaria de 0.007. Ante la ausencia de tales dispositivos especiales, la descarga puede llegar a ser muy rápida una vez pasado el punto de esfuerzo máximo, en particular, para los concretos de mayor resistencia, que son generalmente más frágiles que los de baja resistencia.

Se observa que el módulo de elasticidad  $E_c$ , es decir, la pendiente del tramo recto inicial de la curva esfuerzo-deformación unitaria, aumenta con la resistencia del concreto. El Instituto de Ingeniería de la UNAM, recomienda para los materiales comúnmente usados en el Distrito Federal, un valor de:

$$E_c = 12,000\sqrt{f'_c} \dots \dots \dots (2.1)$$

Así mismo el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal recomienda la utilización de la siguiente fórmula para concretos elaborados con cemento portland ordinario:



$$E_c = 14,000\sqrt{f'c} \dots (2.2)$$

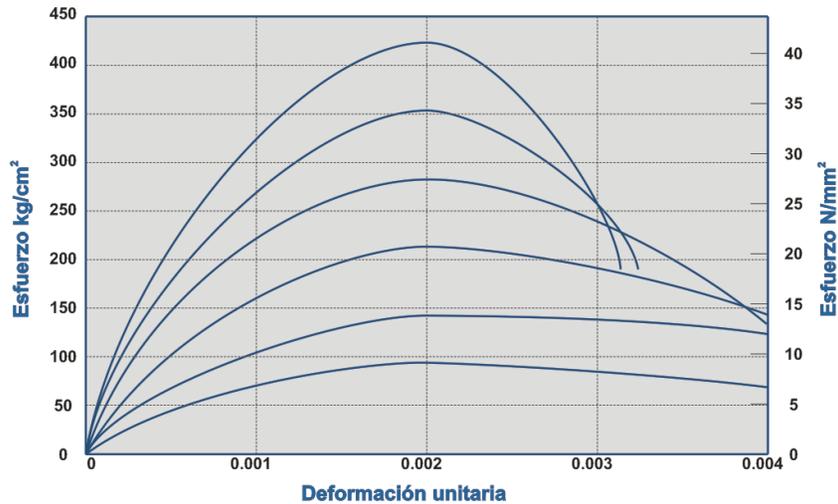


Figura III.1. Curvas esfuerzo-deformación unitaria, de cargas de corta duración.

La información relativa a las propiedades de resistencia del concreto, como la presentada anteriormente, se obtienen con frecuencia mediante ensayos realizados sobre muestras de 28 días de edad. Sin embargo, el cemento continúa su hidratación y, en consecuencia, el concreto sigue con su endurecimiento durante mucho tiempo a una tasa decreciente. La figura III.2 representa una curva del aumento de la resistencia del concreto de acuerdo con la edad para concretos hechos con cemento portland ordinario y cemento de resistencia inicial alta, cada curva normalizada con respecto a la resistencia a la compresión a los 28 días. Se puede observar en la figura, que el cemento de resistencia inicial alta produce un aumento más rápido en la resistencia a edades tempranas, aunque la tasa de aumento disminuye en general para edades mayores.

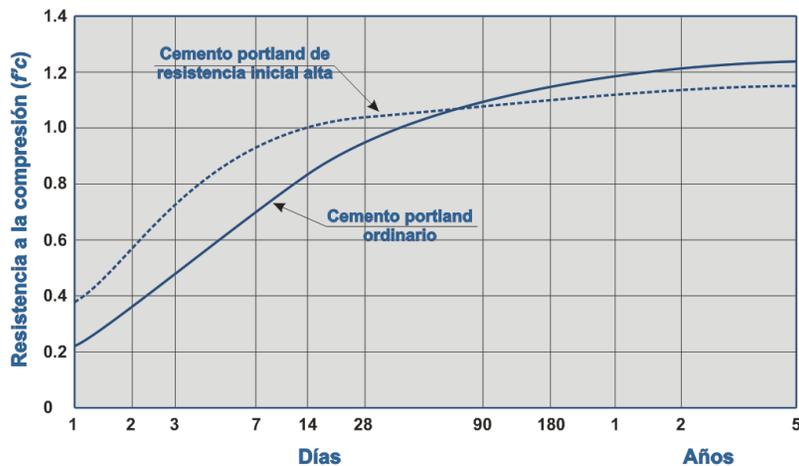


Figura III.2. Efectos de la edad en la resistencia a la compresión para concretos.

### III.3.1.1. Relación agua/cemento

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. En otras, palabras en presencia del agua y los silicatos y aluminatos se forman productos de hidratación, los

cuales, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura que se conoce como pasta de cemento endurecida. A esta reacción química se le conoce comúnmente como **hidratación del cemento**.

Por otro lado, tenemos que la relación agua/cemento, afecta directamente la resistencia del concreto, así tenemos que, a medida que se adiciona agua, la plasticidad y la fluidez de la mezcla aumenta, es decir, mejora la trabajabilidad de la de la pasta de cemento, pero disminuye su resistencia debido al mayor volumen de vacíos creados por el agua libre. De esta manera, desde el punto de vista de la pasta de cemento es uno de los factor que controlan la resistencia del concreto. Para determinar la relación agua/cemento se selecciona la mínima cantidad de agua que asegure la trabajabilidad deseada.

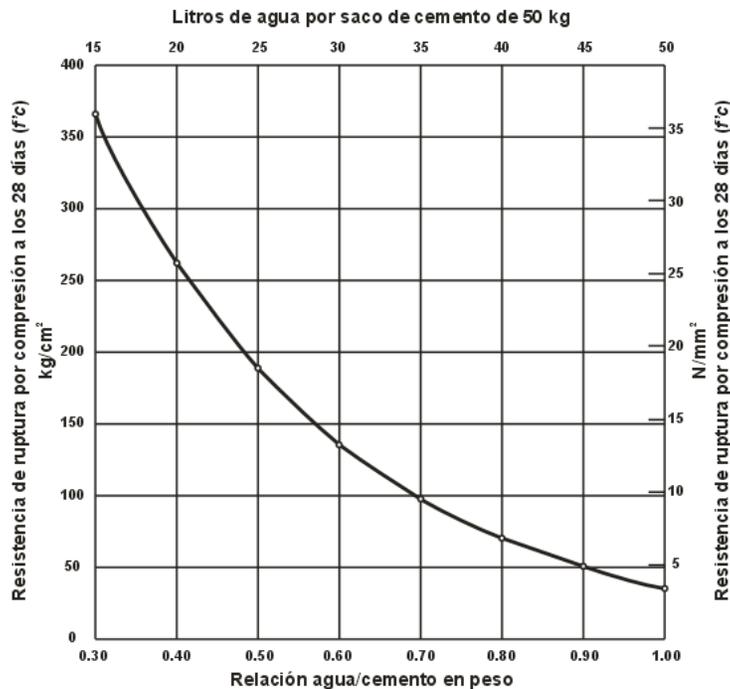
El profesor Duff A. Abrams, del Instituto Lewis de Chicago expreso la ley del endurecimiento del concreto por medio de una fórmula ligada al volumen de agua de hidratación con el volumen del cemento empleado, la cual, queda expresada para mezclas plásticas y usando agregados sanos y limpios para el cemento portland ordinario de la manera siguiente:

$$f'_c = \frac{985}{27^x} \dots \dots \dots (2.3)$$

donde:

- f'c = Fatiga de ruptura a la compresión y a los 28 días, de una probeta cilíndrica de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura.
- x = Relación agua/cemento en peso.

En la figura III.3 se muestra la decisiva influencia de la relación agua/cemento sobre la resistencia a la compresión del concreto que se obtuvo usando la fórmula (2.3).



**Figura III.3.** Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del concreto (curva de Abrams).



Para la estimación de proporciones a partir de relaciones establecidas, son necesarios algunos datos de laboratorio, es decir, deben determinarse la granulometría, la densidad y la absorción, tanto de los agregados finos como de los gruesos y el peso volumétrico.

### III.3.1.2. Fatiga del concreto

Cuando se somete el concreto a cargas cíclicas en vez de que sean sostenidas, su resistencia a la fatiga, al igual que para otros materiales, es considerablemente menor que su resistencia estática. Cuando el concreto simple se somete a esfuerzos de compresión que varían cíclicamente desde cero hasta un máximo esfuerzo, su límite de fatiga está entre el 50 y el 60% de la resistencia a la compresión estática para 2,000,000 de ciclos.

Para otros tipos de aplicación de esfuerzos como el esfuerzo de compresión por flexión en vigas de concreto reforzado o de tensión por flexión en vigas no reforzadas o en el lado de tensión de vigas reforzadas, el límite de fatiga es aproximadamente el 55% de la resistencia estática correspondiente. Sin embargo, estas cifras deben usarse sólo como guías generales. Se sabe que la resistencia a la fatiga del concreto no sólo depende de su resistencia estática, sino también de las condiciones de humedad, de la edad y de la velocidad de aplicación de la carga.

### III.3.1.3. Contracción por secado

Las deformaciones unitarias analizadas hasta ahora eran inducidas por esfuerzos ocasionados por cargas externas. Influencias de naturaleza diferente hacen que el concreto, aun estando libre de cualquier tipo de carga externa, sufra deformaciones y modificaciones en el volumen. De éstas, las más importantes son la contracción por secado y las consecuencias por cambios de temperatura.

Cuando los materiales de concreto se mezclan, la pasta de cemento y agua llenan los vacíos entre los agregados y unen a éstos. Esta mezcla necesita ser suficientemente manejable de modo que pueda fluir entre las barras de refuerzo y la cimbra. Para lograr la requerida manejabilidad se usa más agua que la necesaria.

Después de que el concreto se ha curado y empieza a secarse el agua adicional que se usó en el mezclado empieza a aflorar en la superficie, donde se evapora. A medida que el concreto se seca, se retrae el volumen, probablemente por el desarrollo de la tensión capilar del agua que permanece en el concreto. En cambio si el concreto seco se sumerge en agua, se expande y recupera la mayor parte del volumen perdido en la contracción ocurrida.

La contracción por secado, que continúa durante varios meses a una tasa decreciente, pero que bajo condiciones ordinarias probablemente el 90% se da durante en el primer año, puede ser una propiedad perjudicial del concreto en varios aspectos, que depende de la configuración de el elemento. Cuando no se controla de manera adecuada puede causar grietas en losas, muros, etc., que son poco agradables a la vista y, en general perjudiciales.

Las grietas resultantes pueden reducir la resistencia a cortante de los elementos y puedan dañar la apariencia de la estructura. Además, las grietas permiten que el acero de refuerzo quede expuesto a la atmósfera, con lo que puede incrementarse la corrosión.

Según la naturaleza misma del proceso resulta claro que el principal factor que determina la cantidad de contracción por secado es la relación agua/cemento porque esta última determina la cantidad de agua evaporable en la pasta de cemento y la rapidez a la cual puede moverse el agua hacia la superficie del espécimen. Brooks demostró que la contracción de la pasta de cemento hidratada es directamente proporcional a la relación agua/cemento entre los valores de aproximadamente 0.2 y 0.6. A relaciones agua/cemento

más altas, el agua adicional se remueve durante el tiempo de secado sin que de por resultado contracción.

Otros de los factores que influye en la contracción por secado es la cantidad de cemento empleado. En términos prácticos, una relación agua/cemento constante, la contracción aumenta con un incremento en el contenido de cemento, puesto que esto da como resultado un volumen más grande de pasta de cemento hidratado que está propenso a contracción. La cantidad de contracción depende mucho del tipo de exposición. Por ejemplo, si el concreto se ve sometido a mucho viento durante el curado, su contracción será mayor. Igualmente, una atmósfera húmeda implica menos contracción, mientras que una seca implica mayor contracción.

Para concretos normales, los valores de la retracción del fraguado final están generalmente en el orden de  $400 \times 10^{-6}$  a  $800 \times 10^{-6}$ , que dependen del contenido inicial de agua, del contenido de cemento utilizado, de la temperatura y humedad ambientales y de la naturaleza de los agregados, altamente absorbentes. El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal da valores de contracción por secado igual a 0.001 para concreto de cemento portland ordinario y de 0.002 para concreto de cemento portland resistente a sulfatos.

La importancia de la contracción en estructuras esta relacionada no solamente con la contracción potencial, sino también con, la extensibilidad del concreto, de su resistencia y de su grado de restricción a la deformación que pueda conducir al agrietamiento. La contracción por secado, si no tiene restricciones, da como resultado un acortamiento del elemento sin la formación de esfuerzos por contracción. Si el elemento tiene restricciones para moverse, la creación de esfuerzos puede exceder la resistencia a la tensión del concreto. Este sobreesfuerzo da como resultado agrietamiento debido a contracción por secado. La colocación correcta del acero de refuerzo en el elemento distribuye los esfuerzos de contracción y controla los anchos de las grietas (véase figura III.4).

No existe prueba estándar para valorar el agrietamiento ocasionado por contracción restringida, pero la utilización de un espécimen de concreto con forma de anillo restringido por un anillo de acero interno puede aportar información con respecto de la resistencia comparativa de diferentes concretos al agrietamiento.

Para minimizar la contracción se deberá tomar en consideración los siguientes aspectos: se debe mantener al mínimo la cantidad de agua para la mezcla; proporcionar un buen curado; colocar el concreto para muros y otros elementos constructivos grandes en secciones pequeñas, lo que permitirá que parte de la contracción ocurra antes de colocar la siguiente sección; intercalar juntas constructivas para controlar la posición de las grietas; y usar agregados apropiadamente densos y no porosos.

#### III.3.1.4. Efectos térmicos en el concreto

Como muchos otros materiales, el concreto se expande con un aumento en la temperatura y se contrae con una disminución de la misma. La relación del volumen a la temperatura se expresa por el coeficiente de expansión/contracción térmica. Los cambios de volumen crean esfuerzos si el concreto está restringido como suele suceder en estructuras estáticamente indeterminadas. Los esfuerzos resultantes pueden dar como resultado el agrietamiento del concreto.

El coeficiente de expansión y contracción térmica es de aproximadamente  $9 \times 10^{-6}$  mm/mm por °C, el cual varía poco, pues depende de los tipos de agregado y de la riqueza de la mezcla.

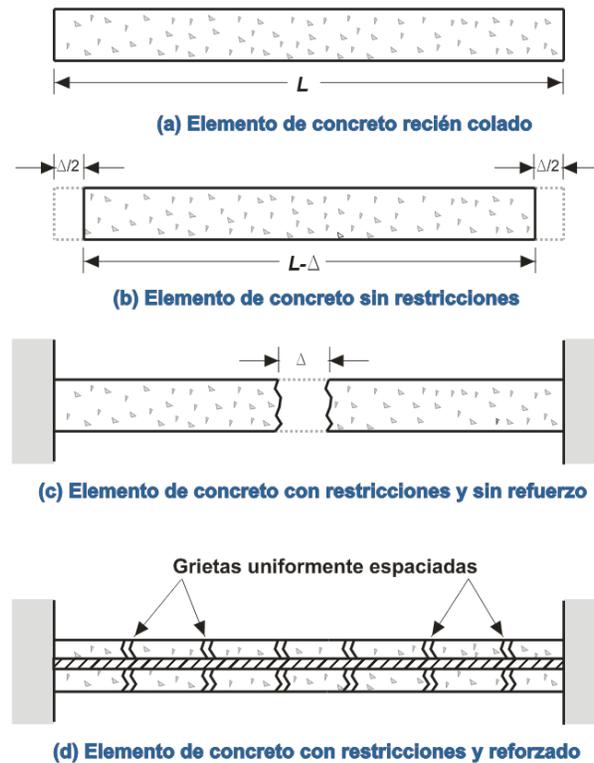


Figura III.4. Presencia de grietas en el concreto bajo diferentes condiciones de restricciones.

Los gradientes de temperatura existen en muchas estructuras. La temperatura en la superficie de una losa de cubierta expuesta a los rayos directos del sol puede alcanzar 48°C, mientras que el lado inferior de la cubierta puede ser de solamente 26°C una diferencia de 22°C. Esto provoca que la superficie de arriba tienda a expandirse más que la superficie de abajo. Esto da como resultado un movimiento hacia arriba durante el calentamiento, y un movimiento hacia abajo durante el enfriamiento (véase figura III.5 (c)).

### III.3.2. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DEL CONCRETO

Aunque el concreto se emplea ventajosamente cuando se utiliza su buena resistencia a la compresión, su resistencia a la tensión (que varía entre 8 y 15% de su resistencia a la compresión) también es importante en varias situaciones. La formación y propagación de las grietas en el lado de tensión de elementos de concreto reforzado sometidos a flexión depende notablemente de la resistencia a la tensión. También ocurren esfuerzos de tensión en el concreto como resultado de cortante, torsión y otras acciones, y en la mayor parte de los casos el comportamiento del elemento cambia después de ocurrir el agrietamiento. Como resultado de lo anterior, es de fundamental importancia poder predecir con suficiente precisión la resistencia a la tensión del concreto.

La resistencia a la tensión del concreto no varía en proporción directa a su resistencia última  $f_c$ . Sin embargo, varía aproximadamente en proporción a la raíz cuadrada de  $f_c$ . Esta resistencia es muy difícil de medir bajo cargas axiales directas de tensión debido al problema de agarre de los especímenes de prueba que da lugar a concentraciones de esfuerzos y debido también a la dificultad de alinear las cargas. Como consecuencia de esos problemas, se han desarrollado dos pruebas indirectas para medir la resistencia a la tensión del concreto. Estas son la prueba del módulo de ruptura y la prueba radial del cilindro.

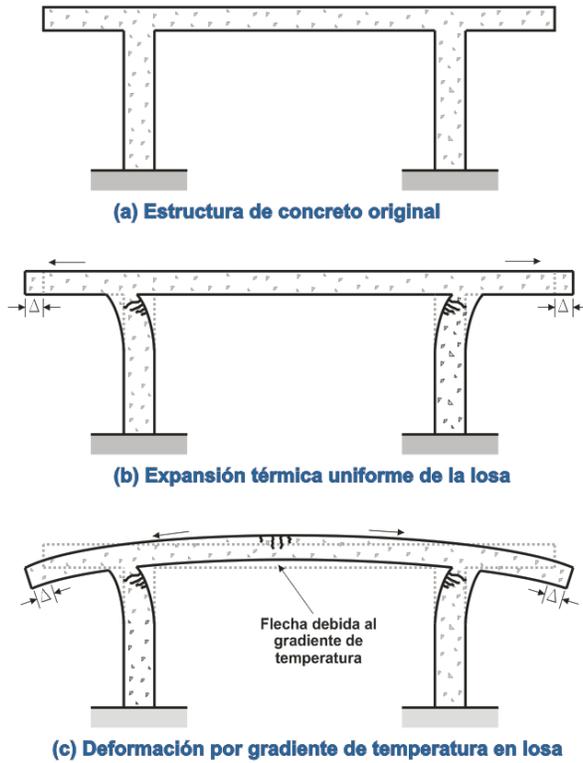


Figura III.5. Deformaciones provocadas en estructuras por efectos de temperatura.

El esfuerzo determinado de estas pruebas no es muy exacto, porque se hace la suposición de que el concreto es perfectamente elástico. Con base en cientos de pruebas se proporciona un módulo de ruptura especificado en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal igual a:

$$\text{Para concreto de cemento portland ordinario } f_t = 2\sqrt{f'c} \dots \dots \dots (2.3)$$

Mientras que la resistencia a la tensión del concreto por falta de información experimental se estima igual a:

$$\text{Para concreto de cemento portland ordinario } f_t = 1.5\sqrt{f'c} \dots \dots \dots (2.4)$$

En apariencia la resistencia a la tensión para concreto depende principalmente de la unión entre la pasta de cemento endurecida y el agregado, mientras que para concretos livianos depende ampliamente de la resistencia a la tensión de los agregados porosos.

Las expresiones anteriores demuestran que la resistencia a la tensión y a la compresión no son de ningún modo proporcionales y, que cualquier incremento en la resistencia a la compresión, está acompañado por un incremento porcentual mucho menor en la resistencia a la tensión.

### III.4. CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO

#### III.4.1. ACERO DE REFUERZO

El acero que comúnmente se emplea para reforzar el concreto tiene forma de barra redonda. Las barras pueden ser lisas o con protuberancias laminadas en sus superficies



para aumentar la adherencia e inhibir el movimiento relativo longitudinal entre el concreto y el acero, llamadas comúnmente corrugaciones. El acero de las barras que se usa en el refuerzo del concreto proviene de la laminación en caliente (a veces completada por un proceso en frío) de lingotes de acero, partiendo del mineral de hierro o de chatarra o bien de la relaminación de rieles de ferrocarril usados.

Las barras lisas no se usan con frecuencia excepto para rodear las barras longitudinales de los algunos elementos. Por ejemplo, estas barras se usan en columnas como estribos y espirales.

Las barras de refuerzo se fabrican en doce diámetros diferentes como se ilustra en la tabla III.6. Las corrugaciones de las barras deben tener una altura mínima comprendida entre 4 y 5% del diámetro nominal de la propia barra y su separación máxima está sujeta a límites establecidos.

Barras N°.	Diámetro nominal (mm)	Área nominal (cm <sup>2</sup> )	Perímetro nominal (mm)	Peso (kg/m)
2	6.4 (1/4")	0.32	20.1	0.251
2.5	7.9 (5/16")	0.49	24.8	0.384
3	9.5 (3/8")	0.71	29.8	0.557
4	12.7 (1/2")	1.27	39.9	0.996
5	15.9 (5/8")	1.99	50.0	1.560
6	19.1 (3/4")	2.87	60.0	2.250
7	22.2 (7/8")	3.87	69.7	3.034
8	25.4 (1")	5.07	79.8	3.975
9	28.6 (1 1/8")	6.42	89.8	5.033
10	31.8 (1 1/4")	7.94	99.9	6.225
11	34.9 (1 3/8")	9.57	109.6	7.503
12	38.1 (1 1/2")	11.40	119.7	8.938

Tablas III.6. Dimensiones y peso de las barras corrugadas (las barras #2 y #2.5 sólo se fabrican lisas).

El diámetro especificado para las barras corrugadas se denomina diámetro nominal y corresponde al diámetro de una barra lisa cuyo peso por metro de longitud sea igual al de la corrugada. El consecuencia, el área real de la sección transversal de las barras corrugadas es menor que el área tabulada que corresponde al círculo definido por el diámetro nominal.

Las barras corrugadas se fabrican en diámetros nominales de fracción de pulgada; se acostumbra designarlas por un número que expresa los octavos de pulgada de su diámetro nominal.

Las barras de refuerzo se utilizan, por lo general, para resistir los esfuerzos de tensión, debido a que el concreto tiene muy poca resistencia a éstos esfuerzos. Por ejemplo, en vigas de concreto reforzado, el concreto resiste la fuerza de compresión, y las barras longitudinales de acero de refuerzo colocadas cerca de la cara de tensión resisten las fuerzas de tensión, y las barras adicionales de acero especialmente dispuestas resisten los esfuerzos inclinados de tensión adicionales causados por fuerza cortante en las vigas.

A pasar de esto, el refuerzo también se utiliza para resistir fuerzas de compresión, especialmente cuando se desea reducir la sección transversal del elemento a compresión, como en el caso de las columnas de los primeros pisos de edificios altos. Incluso si no existiera esta necesidad, se coloca una cantidad mínima de refuerzo en todos los elementos a compresión para asegurarlos contra el efecto de pequeños momentos flectores accidentales que pueden agrietar y también producir una falla de un elemento no reforzado.

Para lograr una efectiva acción del refuerzo, es esencial que el acero y el concreto se deformen en forma conjunta, es decir, es necesario que haya una adherencia suficientemente fuerte entre los dos materiales para asegurar que no ocurrirán movimientos relativos entre las barras de refuerzo y el concreto circundante. Esta unión se produce por la adhesión química relativamente fuerte que se desarrolla en la fase acero-concreto, por la rugosidad natural de la superficie de la barras de refuerzo y por las corrugaciones.

### III.4.2. RESISTENCIA DEL ACERO DE REFUERZO

Las pruebas que se realizan al acero de refuerzo son la de tensión y compresión; sin embargo, la más común es la de tensión ya que la de compresión presenta un problema en su realización debido a la esbeltez de la probeta. La prueba de tensión se lleva a cabo mediante el ensaye de una probeta de 25 cm de longitud sometida a una carga de tensión hasta la ruptura de la varilla (el diámetro puede ser cualquiera de los conocidos). Con esta prueba se obtiene la curva esfuerzo-deformación unitaria, en donde podemos encontrar los elementos que necesitamos para conocer las propiedades de resistencia del material.

Los aceros normales que se utilizan en la laminación de las barras de refuerzo corresponde a tres clases o grados de dureza: grado estructural, grado intermedio y grado duro, caracterizándose cada uno de ellos por el valor del límite elástico aparente con respecto al cual se toman los coeficientes de seguridad para fijar la fatiga de trabajo que aparece en la figura en la tabla III.7 y en la figura III.6.

	Grado estructural	Grado intermedio	Grado duro
Límite elástico aparente (kg/cm <sup>2</sup> )	2,300 mínimo	2,800 mínimo	3,500 mínimo
Fatiga permisible de trabajo (kg/cm <sup>2</sup> )	1,265	1,400	1,400
Fatiga de ruptura	3,900 a 5,300	4,900 a 6,300	5,600 mínimo

**Tabla III.7.** Grados del acero para las barras de refuerzo utilizadas para reforzar el concreto.

Con objeto de lograr mayor claridad en el uso de los términos técnicos relativos a las propiedades mecánicas de los aceros de refuerzo, se dan las siguientes definiciones de acuerdo a las normas ASTM:

- **Límite de proporcionalidad.** Es el mayor esfuerzo que puede soportar un material sin apartarse de la ley de Hooke (proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones).
- **Límite elástico.** Es el mayor esfuerzo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes una vez que se le ha liberado de las cargas (este esfuerzo suele ser menor que el correspondiente al límite de proporcionalidad).
- **Módulo de elasticidad.** Es el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria correspondiente, dentro de los límites de proporcionalidad.
- **Límite elástico aparente o Límite de fluencia.** Es el primer esfuerzo en un material (menor que el máximo que puede soportar) para el cual ocurre un incremento de la deformación, para un valor constante de esfuerzo.
- **Límite plástico.** Es el esfuerzo bajo el cual un material sufre una desviación (deformación) definida por la ley de proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones. Como es prácticamente imposible determinar el esfuerzo para el cual principia la conducta plástica del material en estudio, se acostumbra obtener el valor del límite plástico por dos métodos: el método de la paralela y el método de deformaciones completa.



Las curvas esfuerzo-deformación unitaria muestran una porción elástica seguida de una plataforma de fluencia, es decir, una porción horizontal de la curva donde la deformación unitaria aumenta continuamente bajo esfuerzos constantes. Esta porción horizontal se hace más visible en aceros de menor grado, es decir, aquellos aceros que tienen un bajo contenido de carbón. Para estos aceros, el punto de fluencia es el esfuerzo para el cual la plataforma de fluencia queda claramente definida. Para deformaciones unitarias mayores, los esfuerzos comienzan a aumentar de nuevo pero a una tasa menor, dándose un proceso que se conoce como «**endurecimiento por deformación**». La curva tiende a hacerse horizontal cuando alcanza la resistencia a la tensión; luego comienza a descender hasta que se llega a la ruptura. Los aceros de mayor resistencia, tienen una plataforma de fluencia de mucha menor longitud o inicia el endurecimiento por deformación inmediatamente sin que se presente ninguna fluencia continua a esfuerzos constantes. En este último caso el Código ACI especifican que el esfuerzo de fluencia,  $f_y$ , debe determinarse como un esfuerzo que corresponde a una deformación de 0.0035, mientras que el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal establece una deformación unitaria de 0.002. Así tenemos, que los aceros de alta resistencia rara vez presentan alguna plataforma de fluencia y, por lo tanto, entran en proceso de endurecimiento por deformación inmediatamente después de iniciada la fluencia.

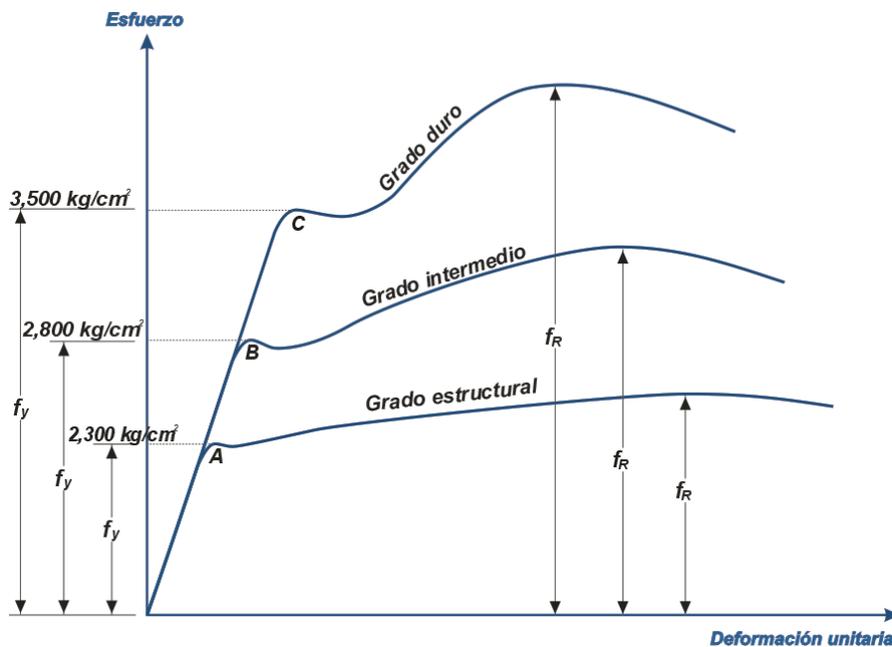


Figura III.6. Curvas esfuerzo-deformación unitaria del acero de refuerzo de diferentes grados.

La forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria y, en particular, la del tramo inicial tiene una influencia significativa en el comportamiento del elemento de concreto reforzado. Así mismo, puede observarse en este tramo que el módulo de elasticidad para los tres grados de dureza es el mismo y se acostumbra un valor de  $E_s = 2,000,000 \text{ kg/cm}^2$ .

En México se fabrican aceros con un límite de fluencia de  $30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $42 \text{ kg/mm}^2$  y  $52 \text{ kg/mm}^2$  los que se designan, respectivamente, como 30, 42 y 52.

### III.5. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO

Los morteros se definen como mezclas de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos.

Contrariamente a otros materiales constructivos, el mortero tiene la peculiaridad de ser empleado en muy distintas aplicaciones en edificación. Estas posibilidades vienen determinadas por los siguientes factores:

- **Adaptabilidad.** El mortero se puede adaptar a cualquier superficie y volumen, forma e intersticio. Tampoco requiere tolerancias dimensionales.
- **Facilidad de aplicación.** A diferencia de otros materiales los morteros no requieren herramientas especiales o sofisticadas para su puesta en obra. Pueden ser aplicados manualmente o por proyección.
- **Dosificación diseñables de sus componentes.** El mortero ofrece la posibilidad de adaptar sus propiedades a las exigencias que se deseen conforme a la composición y dosificación precisas.

Los morteros principalmente tienen un uso enfocado hacia la albañilería común, sin embargo, pueden tener otras aplicaciones derivadas de las prestaciones específicas de los morteros especiales.

El mortero se utiliza en muy diversas aplicaciones en el ámbito de la edificación (formación de fábricas, revestimientos, solados, reparaciones, etc.). Como consecuencia de su adaptabilidad y polivalencia constructiva, tales prestaciones requieren un conocimiento especializado de cada aplicación, considerando las variables y características específicas de los diferentes tipos de morteros.

Todas estas posibilidades dan origen a una diversa gama de productos designados bajo la acepción de morteros especiales. Podemos establecer una primera clasificación de acuerdo con su aplicación constructiva en la que diferenciamos:

- Morteros para formación de fábricas.
- Morteros de revestimiento.
- Morteros para solados.
- Morteros cola.
- Morteros de reparación.
- Morteros impermeabilizantes.

Esta clasificación puede diversificarse e incrementarse pero las clases de morteros señaladas cubren la mayor parte de las aplicaciones edificatorias.

Así tenemos que, la tecnología de fabricación de los morteros y su llegada a obra ha evolucionado y se ha diversificado considerablemente en los últimos años. Desde los tradicionales morteros *in situ* a los actuales morteros industriales suministrados desde fábrica, se establece otra clasificación según su forma de fabricación. En este sentido se distingue tres grandes grupos:

- **Morteros hechos «in situ».** Estos morteros están compuestos por los componentes primarios, dosificados, mezclados y amasados con agua en la obra.
- **Morteros industriales semiterminados.** Dentro de este grupo existen los *morteros predosificados* y los *morteros premezclados de cal y arena*.



- *Morteros predosificados:* son aquéllos cuyos componentes básicos (conglomerantes y áridos) dosificados independientemente en una fábrica, se suministran al lugar de su utilización, donde se mezclan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante y se amasan con el agua precisa hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización. Estos morteros pueden tener aditivos y/o adiciones en sus correspondientes compartimentos. Los componentes básicos de estos morteros se presentan (por regla general) en un silo que tiene un compartimento para cada material (conglomerantes, por una parte, y áridos, por otra); de aquí que estos morteros también se conozcan como «morteros de dos componentes».
- *Morteros premezclados de cal y arena:* son aquellos cuyos componentes se han dosificado y mezclado en fábrica para su posterior suministro al lugar de construcción, donde se les puede añadir otro u otros componentes especificados o suministrados por el fabricante (por ejemplo, cemento). Se mezclan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante y se amasan con el agua precisa hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización.
- **Morteros industriales.** Son aquéllos que se han dosificado, mezclado y, en su caso, amasado con agua en una fábrica y suministrado al lugar de construcción. Estos morteros pueden ser «morteros secos» o «morteros húmedos».
  - *Morteros húmedos:* son mezclas ajustadas a la medida en sus componentes primarios (conglomerantes, áridos y aditivos). Además pueden tener adiciones en proporciones adecuadas. Se amasan en una fábrica con el agua necesaria hasta conseguir una mezcla homogénea para su utilización. Los morteros húmedos precisan añadir retardadores para prolongar su trabajabilidad.
  - *Morteros secos:* son mezclas ajustadas a medida en sus componentes primarios (conglomerantes y áridos secos). Además pueden tener aditivos y/o adiciones en proporciones adecuadas preparadas en una fábrica. Se suministran en silos o en sacos y se amasan en la obra, con el agua precisa, hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización.

### III.5.1. MATERIALES COMPONENTES DEL MORTERO

#### III.5.1.1. Cales

Las cales utilizadas en los morteros pueden ser aéreas o hidráulicas.

- *Cal Aérea.* Las cales aéreas hidratadas (apagadas) endurecen únicamente con el aire. Esta cal, amasada con agua y expuesta a la acción del aire, primero fragua por cristalización del hidróxido cálcico y luego endurece al carbonatarse los cristales por acción del CO<sub>2</sub> atmosférico. El proceso es lento y el producto resultante poco resistente a la acción del agua.
- *Cal Hidráulica.* Las llamadas cales hidráulicas son amasadas con agua para formar pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes. El proceso es más rápido que en el caso de la cal aérea y da lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua.

En general, la cal se usa para mejorar la plasticidad del mortero y aclarar su color.

### III.5.1.2. Cementos

Son los conglomerantes hidráulicos más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso.

Se distinguen cementos comunes (CEM), blancos (BL), resistentes a sulfatos (SR) y/o al agua del mar (MR). La selección y clasificación de los cementos se realiza en función de la aplicación del mortero, si bien las mejores prestaciones y fiabilidad se obtienen en los morteros industriales frente a los elaborados in situ.

A partir de lo anterior, conviene explicar con mayor profundidad la principal cualidad del cemento portland dentro de los morteros, que además lo caracteriza:

- a) Cuando se mezcla un conglomerante hidráulico con una cantidad conveniente de agua, para obtener una consistencia normal, se forma inmediatamente una masa de carácter plástico, que es moldeable pero con el tiempo va aumentando su viscosidad y su temperatura. Durante unos 15 minutos, es posible conseguir una mayor fluidez mediante amasado mecánico. Presenta pues, un carácter «tixotrópico».
- b) Al cabo de un tiempo, que puede oscilar entre los 15 y los 120 minutos aproximadamente (dependiendo del tipo de componentes empleados), la masa tiende a volverse rígida, dando lugar al «fraguado inicial». Cuando se inicia el fraguado, el mortero debe estar colocado en obra, toda operación de reamasado, vertido, etc. es perjudicial para el correcto desarrollo de las propiedades del mortero.
- c) Desde el principio de fraguado la resistencia mecánica de la masa aumenta, debido a la formación de fases cristalinas insolubles, deshidratando parcialmente la masa, hasta llegar a ser completamente indeformable. Este instante se conoce como «final de fraguado» y es el período de fraguado, que puede durar entre 45 minutos y 10 horas, según los casos.

A partir del final del fraguado, se produce el «Período de Endurecimiento» (4 horas en adelante), fase donde existe un crecimiento exponencial de las resistencias mecánicas de la masa, debido a consolidación final mediante formación de fases cristalinas que rellenan los huecos y a la evaporación del agua sobrante. A los 28 días, en condiciones normalizadas, se obtiene una resistencia a compresión que define el tipo de mortero. En la resistencia final es fundamental la incidencia de las condiciones ambientales y de aplicación, en especial el curado.

### III.5.1.3. Áridos

Los áridos que forman parte de morteros son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable. Su naturaleza se define como inerte ya que por sí solos no pueden actuar químicamente frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos (aire, agua, hielo, etc.). Sin embargo, sí influyen de forma determinante en las propiedades físicas del mortero, al unirse a un conglomerante. En general, no son aceptables áridos que contengan sulfuros oxidables, silicatos inestables o componentes de hierro igualmente inestables.

Según su procedencia y método de obtención, los áridos pueden clasificarse en:



- **Áridos naturales.** Son los procedentes de yacimientos minerales obtenidos sólo por procedimientos mecánicos. Están constituidos por dos grandes grupos:
  - *Áridos granulares.* Se obtienen básicamente de graveras que explotan depósitos granulares. Estos áridos se usan después de haber sufrido un lavado y clasificación. Tienen forma redondeada, con superficies lisas y sin aristas, y se les denomina «áridos rodados». Son principalmente áridos de naturaleza silíceo.
  - *Áridos triturados.* Se producen en canteras tras arrancar los materiales de los macizos rocosos y someterlos posteriormente a trituración, molienda y clasificación. Presentan superficies rugosas y aristas vivas. Son principalmente áridos de naturaleza caliza, aunque también pueden ser de naturaleza silíceo.
- **Áridos artificiales.** Están constituidos por subproductos o residuos de procesos industriales, resultantes de un proceso que comprende una modificación térmica u otras. Son las escorias siderúrgicas, cenizas volantes de la combustión del carbón, etc.
- **Áridos reciclados.** Resultan de un tratamiento del material inorgánico que se ha utilizado previamente en la construcción, por ejemplo, los procedentes del derribo de edificaciones, estructuras de firmes, etc.

#### III.5.1.4. Aditivos

Son sustancias o materiales añadidos, antes o durante la mezcla del mortero, en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento (su proporción no supera el 5% en masa del contenido de cemento). Su función es aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones bien definidas y con carácter permanente.

Estos componentes pueden producir una única modificación en las características del mortero (Función principal); o bien, además, modificaciones adicionales (Función secundaria).

Los aditivos más comunes se clasifican según las propiedades que confieren al mortero, conforme a su función principal, en los siguientes grupos principales:

- **Aireante: modificadores del contenido en aire.** Este efecto consiste en la introducción dentro de la masa de mortero de pequeñas burbujas de aire de diámetro comprendido entre 10 y 500 micras durante el amasado. Estas burbujas son muy beneficiosas ya que:
  - Debido a su forma esférica y flexible actúan como lubricante del mortero en estado fresco, mejorando la trabajabilidad.
  - Interrumpen la red capilar de la masa del mortero, impidiendo la penetración de agua y productos de la hidratación del cemento, protegiendo la masa del efecto de las heladas.
  - Al incluir aire, disminuyen la densidad aparente del mortero fresco, lo cual, unido a lo anterior, tiende a evitar la segregación y exudación del mortero en estado fresco.

El contenido de este aditivo debe ser perfectamente controlado puesto que su exceso deriva en una sensible pérdida de las resistencias finales del mortero.

- **Plastificante: modificadores de la reología en estado fresco.** Este efecto provoca que aumente la trabajabilidad del mortero en estado fresco. Se consigue mediante la dispersión temporal de las partículas de cemento, que origina:
  - Reducción de la relación agua/cemento en beneficio de la resistencia mecánica y la durabilidad.
  - Aumento de la plasticidad del mortero permaneciendo la mezcla trabajable durante un mayor período de tiempo.

Por el contrario, un inadecuado contenido de los plastificantes puede acarrear un excesivo tiempo de fraguado.

- **Retardantes: Modificadores del tiempo de fraguado y/o endurecimiento (Retardadores del fraguado).** Son aditivos que retrasan el tiempo de fraguado del cemento, de modo que aumenta el periodo necesario para que los morteros pasen del estado plástico al estado sólido, sin influir notablemente en la evolución de las resistencias mecánicas en las edades finales. Así, prolongan el tiempo de trabajabilidad del mortero.

Como en los casos anteriores, debe medirse cuidadosamente las proporciones de los retardantes empleados para no ocasionar efectos contraproducentes en el resultado final de la mezcla.

- **Hidrofugantes.** *Están compuestos principalmente por ácidos grasos saturados o insaturados.* El principal efecto de estos aditivos es minimizar la absorción de agua por los capilares del mortero endurecido. Esto no supone que el mortero sea impermeable (para ello hay que recurrir a imprimaciones especiales), sino que su capacidad de absorción frente al agua a baja presión (agua de lluvia) es sustancialmente menor que un mortero fabricado sin este aditivo.
- **Retenedores de agua.** Estos aditivos aumentan enormemente la capacidad de retención de agua e impiden, así, que el mortero pierda agua con demasiada rapidez. Se fundamentan en el incremento de la viscosidad de la pasta y generan los siguientes efectos:
  - Reducen la absorción de agua y su tendencia a la evaporación.
  - Mantienen suficiente agua para que el cemento se hidrate convenientemente y desarrolle, de modo conveniente, todas sus propiedades.
  - Modulan la viscosidad de la masa de mortero.
  - Atenúan la tendencia a la exudación en los casos de granulometrías incorrectas o carencia de finos.



- **Resinas.** Las resinas se definen como ligantes orgánicos poliméricos que aportan, principalmente al mortero, adherencia química. Se emplean fundamentalmente para la fabricación de morteros cola, impermeables, de reparación, etc. Las resinas mejoran las propiedades durante la aplicación del mortero, en el fraguado y a lo largo de su vida útil. Entre otros efectos, son destacables:
  - Aumento de la capacidad adherente.
  - Aumento de la elasticidad.
  - Mejora de la impermeabilidad.

#### III.5.1.5. Adiciones

Las adiciones son materiales inorgánicos que finamente divididos se pueden utilizar en la fabricación de morteros con el fin de mejorar ciertas propiedades o conseguir propiedades especiales. Son preferentemente materiales inorgánicos tales como: pigmentos, puzolanas, cenizas volantes, escorias, de sílice, etc.

Los colorantes son pigmentos, que añadidos a la mezcla del mortero en el momento de su fabricación, tienen por finalidad dar al mismo una coloración distinta a la gris o blanca que normalmente presenta, de acuerdo con unos requerimientos estéticos.

Los pigmentos empleados deben presentar gran estabilidad frente al paso del tiempo, variaciones térmicas y radiación solar.

El efecto de los pigmentos es diferente en el mortero fresco que en el endurecido. Generalmente, en este último, los tonos se aclaran por lo que es conveniente realizar pruebas previas cuando se quieran conseguir tonalidades de color determinadas.

Otro destacado material entre las adiciones son las cenizas volantes, Su empleo, ya sea al incorporar las cenizas en suspensión directamente en el seno de la mezcla, modifica alguna de las características más importantes de los morteros. Se registra una mejora entre las prestaciones que son frecuentemente exigidas tales como: la trabajabilidad, la resistencia, la retracción de fraguado, el calor de hidratación, la impermeabilidad, la durabilidad y la reacción álcali-árido.

#### III.5.1.6. Agua

El agua utilizada, tanto en el amasado como durante el curado en obra, debe ser de naturaleza inocua. No contendrá ningún agente en cantidades que alteren las propiedades del mortero, tales como sulfatos, cloruros, etc. De lo contrario pueden derivarse, por ejemplo, eflorescencias si el contenido en sales solubles es elevado. O bien, en el caso de morteros armados, se cuidará especialmente que no porte sustancias que produzcan la corrosión de los aceros.

### III.5.2. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO FRESCO

#### III.5.2.1. Consistencia

La consistencia de un mortero define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta

cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como de las condiciones ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc. La trabajabilidad mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes.

Puesto que la consistencia se adquiere mediante adición de agua a la masa de arena y conglomerante, esta propiedad se relaciona directamente con la proporción agua/cemento, crucial para el completo desarrollo de las propiedades resistentes del mortero.

El exceso de agua produce frecuentemente la exudación, fenómeno por el que el agua de la parte inferior se mueve hacia arriba especialmente cuando la granulometría tiene gran porcentaje de árido grueso que se deposita en la parte inferior. El resultado es una mezcla no homogénea con una posible merma en las propiedades finales del mortero endurecido.

#### **III.5.2.2. Adherencia (en estado fresco)**

La adherencia consiste en la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interfase mortero-base. Se refiere, por tanto, a la resistencia a la separación del mortero sobre su soporte.

La adherencia del mortero fresco es debida a las propiedades reológicas de la pasta del conglomerante, donde la tensión superficial de la masa del mortero fresco es el factor clave para desarrollar este tipo de característica.

La adherencia, antes de que el mortero endurezca, se incrementa cuanto mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos. Sin embargo, el exceso de estos componentes puede perjudicar otras propiedades.

#### **III.5.2.3. Contenido de iones de cloruro**

La presencia de iones cloruro, solubles en el agua de amasado del mortero, puede influir en el proceso de corrosión en el caso de existir armaduras, así como en la aparición de eflorescencias. Por consiguiente se establece que el contenido de estos cloruros no superará el 0,1% de la masa de la muestra en seco.

#### **III.5.2.4. Capacidad de retención de agua**

De esta propiedad depende la trabajabilidad del mortero fresco. La retención de agua se haya íntimamente relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y árido. El agua que tenga en exceso la cederá fácilmente por succión del soporte sobre el que se aplica.

La retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero.

Al aplicar un mortero sobre un soporte es fundamental que éste se encuentre humedecido para que no capture el agua de amasado retenida por el mortero. De este modo se reduce la succión que el soporte realiza sobre el mortero en estado fresco.



Otro factor que favorece este «robo» de agua al mortero proviene de los agentes externos (temperaturas elevadas, viento, etc.). Ante estos casos es recomendable reponer el agua sustraída, mediante el curado del mortero en su proceso de fraguado.

Un mortero bien dosificado y amasado puede llegar a desprenderse y no adquirir resistencia ni adherencia por falta de hidratación del cemento, si no se consideran estos factores.

### III.5.3. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO ENDURECIDO

La prescripción de los morteros a emplear en obra debe considerar las acciones mecánicas previstas en el proyecto, que no alcanzarán su estado límite de agotamiento. Además, deben estimarse las acciones ambientales de tipo físico o químico que puedan deteriorar el material o reduzcan su tiempo de vida útil.

Desde su colocación existen una serie de factores que tienden a destruir el mortero. La durabilidad es la resistencia del mortero al ataque de un conjunto de agentes, tanto propios de la ejecución, como de su vida de uso, que alteran sus condiciones físicas con el tiempo. De estas exigencias nace el estudio de las propiedades del mortero en estado endurecido.

#### III.5.3.1. Resistencia mecánica

El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento de unión resistente compartiendo las solicitaciones del sistema constructivo del que forma parte. El mortero utilizado en juntas debe soportar inicialmente las sucesivas hiladas de ladrillos o bloques. Luego, la resistencia del mortero influirá, por ejemplo, en la capacidad de una fábrica para soportar y transmitir las cargas a las que se ve sometida. Así mismo, el mortero para solados resistirá el peso de personas y enseres que se asienten sobre él.

Las resistencias a compresión y flexión del mortero se obtienen conforme a los resultados del ensayo de probetas prismáticas de 40x40x160 mm de 28 días de edad, conservadas en laboratorio. Los morteros se designan según su resistencia a compresión a esta edad, medida en  $N/mm^2$ .

#### III.5.3.2. Adherencia (estado endurecido)

La adherencia se basa en la resistencia a tracción de la unión entre un mortero y un soporte definido. Resulta especialmente importante en morteros para repellado y morteros cola.

Lógicamente, la adherencia depende de tres aspectos fundamentales:

- El mortero.
- El soporte y su preparación.
- La forma de aplicación.

Constituye una propiedad fundamental pues determina la unión solidaria entre las piezas o partes unidas influyendo en la resistencia del conjunto de, por ejemplo, una fábrica. Así mismo, una baja adherencia puede causar desprendimientos de las piezas de revestimientos interiores o exteriores fijadas por el mortero. En el caso de los aplanados los desprendimientos del mortero ocasionan la desprotección de la fachada.

Existen dos tipos adherencia: química, basada en los enlaces, y física, fundamentada en el anclaje mecánico entre las piezas (adhesión).

La adherencia de tipo físico-mecánico está fundamentada en la trabazón entre sólidos. El mortero se aplica en estado plástico sobre la superficie del soporte. Ésta debe ofrecer suficientes posibilidades de anclaje (porosidad), para que el cemento disperso y disuelto del mortero penetre en los poros del soporte. Después, al irse formando las agujas de cemento hidratado e ir completándose el proceso de fraguado, se crean nuevos puntos de anclaje entre el mortero y la pieza sobre la que se une.

Por lo tanto, al aplicar un mortero sobre un soporte, bien para la realización de una fábrica, bien para la formación de un revestimiento es imprescindible que el mortero ancle en la superficie que lo recibe. No son efectivas resistencias elevadas en el mortero si no se produce este efecto.

Los soportes muy absorbentes sustraen el agua del mortero y no permiten la hidratación del cemento en la superficie que los une. Por el contrario, los soportes totalmente impermeables impiden la formación del suficiente agarre entre ambos materiales.

La adherencia química se fundamenta en la formación de enlaces químicos localizados en la superficie de contacto entre el mortero y el soporte. Este tipo de adherencia en los morteros cola está causada por el empleo de aditivos de resinas poliméricas. En estos casos resulta en combinación con la adherencia mecánica o adhesión.

### III.5.3.3. Retracción

La retracción es una contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento. Dicha retracción es provocada por la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del mortero.

Se ha demostrado que las retracciones son más elevadas cuanto más rico en cemento y elementos finos son los morteros. También se ha observado que la retracción aumenta cuanto mayor es la cantidad de agua de amasado.

Distinguiremos tres tipos de retracción: plástica, hidráulica o de secado y térmica.

- **Retracción plástica.** Es una contracción por desecación durante el proceso de fraguado, cuando el mortero no es capaz de transmitir ni soportar tensiones producidas por la rápida evaporación del agua. Da lugar a una fisuración frecuentemente llamada de *afogado*, caracterizada por muchas fisuras próximas que se cruzan con aspecto de piel de cocodrilo y que no llegan a alcanzar gran profundidad. A mayor dosificación de cemento mayor es el valor de la retracción plástica. La fisuración se produce fundamentalmente en elementos superficiales, de poco espesor, ante temperaturas elevadas con vientos secos y falta de curado.
- **Retracción hidráulica o de secado.** Es la contracción del mortero por evaporación del agua, que se produce al haber finalizado el fraguado. Si la retracción de secado es intensa causa un cambio volumétrico capaz de crear tensiones importantes en zonas impedidas de deformarse. Si se supera el



valor de adherencia del mortero, ocasiona que los bordes de las fisuras se levanten y abarquillen.

La retracción hidráulica aumenta con:

- El espesor de recubrimiento.
- La riqueza de conglomerante del mortero y la finura de molido de éste.
- La mayor relación agua/cemento.
- La menor relación volumen/superficie.

Está influenciada también por la naturaleza de los áridos así como por las condiciones y tipo de curado empleados.

- **Retracción térmica.** Es la contracción experimentada por el mortero, por variación en la temperatura de su masa durante el endurecimiento. Si el calor alcanzado al iniciarse el endurecimiento se debe a la reacción exotérmica de los granos de cemento, un mortero pobre, con poco cemento, sufre un incremento de temperatura inferior a un mortero con más cemento y consecuentemente menores retracciones.

#### III.5.3.4. Absorción de agua

Afecta a los morteros que quedan expuestos directamente a la lluvia. Su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad de un aplanado o del mortero que forma las juntas de una fábrica. Si el mortero es permeable al agua, transmitirá ésta hacia el interior originando la consiguiente aparición de humedades por filtración. Además, con la succión del agua exterior se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para la durabilidad del conjunto constructivo, como en el caso de las eflorescencias.

La absorción depende de la estructura capilar del material, por lo tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará. La incorporación de aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes también contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros que los incorporan.

#### III.5.3.5. Densidad (estado endurecido)

La densidad del mortero dependerá fundamentalmente de la que tengan sus componentes: arenas, adiciones, así como con su contenido en aire, etc. También es determinante la granulometría y volumen que éstos ocupen en su dosificación. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación más poroso es el mortero.

Para fabricar un mortero ligero pueden usarse áridos artificiales ligeros (arcilla expandida) o, más comúnmente añadir aditivos aireantes. Se clasifican como morteros ligeros aquellos cuya densidad es igual o menor que  $1,300 \text{ kg/m}^3$ .

#### III.5.3.6. Permeabilidad al vapor de agua

Si anteriormente reseñábamos la conveniencia de impermeabilidad en los morteros expuestos al agua, resulta deseable, sin embargo, su permeabilidad al

vapor. El paso del vapor a través de la estructura capilar del material favorece su transpiración impidiendo la aparición de condensaciones en el interior, por causas higrotérmicas.

### III.5.3.7. Comportamiento térmico

Esta característica viene dada por la conductividad térmica del material que indica la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo por una superficie unidad del material. La conductividad depende de la densidad, porosidad, contenido de humedad, etc. En el caso de los morteros estos parámetros dependen de los componentes y proporciones que contengan siendo fundamental la densidad final de la mezcla.

### III.5.3.8. Comportamiento ante el fuego

Existen dos parámetros fundamentales que caracterizan el comportamiento ante un incendio: la Reacción (M) y la Resistencia ante el Fuego (RF).

La Reacción ante el Fuego clasifica a los morteros en la clase menos peligrosa que indica que un material no es combustible ante la acción térmica.

La Resistencia ante el Fuego indica que un mortero, sometido a las altas temperaturas desarrolladas en un incendio, sufre una serie de cambios que afectan a su resistencia mecánica. En general, a temperaturas superiores a 250°C, las propiedades resistentes del mortero sufren una caída irreversible, quedando también afectado el color de éste.

En zonas continuamente expuestas a elevadas temperaturas se recomienda el uso de morteros aislantes o refractarios. Para ello son útiles los áridos expandidos, por su baja conductividad térmica y el empleo de aireantes. También el uso de arenas calizas aumenta el poder aislante, sobre todo hasta los 500°C, porque el calor absorbido por el recubrimiento se emplea en descomponer el carbonato cálcico. No obstante, en estos casos se produce un decremento de las propiedades resistentes.

Se puede decir que los factores que influyen sobre la resistencia son muy numerosos, abarcando desde los distintos tipos y calidades de los componentes empleados, las dosificaciones, las formas de ejecución, las condiciones de curado, hasta el evidente factor de la edad. La tabla III.8 muestra el proporcionamiento recomendado para diferentes tipos de morteros y su correspondiente resistencia.

Tipo de mortero	Partes de cemento	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena	Valor de la resistencia nominal en compresión Kg/cm <sup>2</sup>
I	1	—	0 a 1/4	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes de columnas	125
	1	0 a 1/2	—		
II	1	—	1/4 a 1/2		75
	1	1/2 a 1	—		
III	1	—	1/2 a 1 1/4		40

**Tabla III.8.** Proporcionamiento recomendado para diferentes tipos de mortero.

Las fisuras que se presentan debidos a la retracción del mortero, se pueden evitar o mitigar, mediante múltiples métodos:

- Evitar la menor cantidad de agua para el amasado.
- Realizar un buen curado.



- Mediante la utilización de aditivos retenedores de agua.
- Mediante la adición de fibras.
- Mediante la adición de cal a los morteros de cemento.

### III.5.4. MORTEROS DE RESINAS

Estos morteros están formulados con resinas orgánicas donde la unión y la resistencia del conjunto es dada por la reacción de polimerización y endurecimiento de los componentes de las resinas, en ausencia de agua. El cemento portland puede entrar en la composición del producto como un agregado fino también llamado relleno, completando la distribución granulométrica y relleno los vacíos de arena, actuando como inerte.

Los morteros de resinas son morteros con elevada resistencia mecánica y química, apropiado para ambientes altamente agresivos o en aquellos lugares donde son exigidos altos rendimientos de las reparaciones, refuerzos y protección. Los morteros de resinas dan lugar a una protección del acero contra la corrosión debido a la impermeabilidad de la capa de forma alrededor de la barra actuando de diferente forma a los morteros tradicionales. Existen diversos tipos de morteros de resinas los cuales se distinguen de acuerdo a su base:

- Morteros de base epóxica.
- Morteros de base poliéster y base estervinílica.
- Morteros de base furánica.
- Morteros de base fenólica.
- Morteros de base poliuretano.

Los morteros de base epoxi son los más empleados en trabajos de reparación, generalmente ofrecidos en dos o tres componentes; la resina (epóxica), el endurecedor (amina y/o poliamidas) y agregados seleccionados. Estos morteros tienen características mecánicas excelentes y una gran resistencia química frente a álcalis, ácidos no oxidantes, grasas, aceites y un gran número de disolventes orgánicos. Estos morteros son atacados por ácidos oxidantes y blanqueadores. La resistencia térmica no supera a los 70 °C.

Los morteros de base epóxica son los más adecuados para trabajos de reparación empleándose en espesores de hasta 30 mm sin que se presenten problemas.

Los morteros de base poliéster y base estervinílica son productos tricomponentes constituidos por resinas en solución, catalizador y rellenos inertes con modificadores de formulación. Estos morteros poseen una resistencia química y mecánica muy buena, resistiendo muy bien tanto a los ácidos como a las bases. Su comportamiento es bueno frente a soluciones de pH comprendido entre 1 y 14. Estos morteros son atacados por productos caústicos y blanqueadores. Por otra parte estos productos son menos sensibles a la acción de las altas temperaturas que los epóxicos, resistiendo temperaturas de hasta 110 °C.

Los morteros de base poliéster sólo pueden aplicarse en superficies y espesores reducidos debido al problema de retracción térmica que presentan. Estos morteros son usados, por lo general, en la reparación pavimentos.

Los morteros de base furánica están constituidos por resina líquida, catalizador y relleno (sílica, carbono, barita o coque pulverizado). Estos morteros son resistentes a ácidos no oxidantes, álcalis, disolventes, sales, gases, aceites, grasas y detergentes. Su comportamiento es bueno dentro del margen de pH entre 1 y 13. Pueden ser usados en temperaturas de hasta 200 °C.

Los morteros de base fenólica están formulados por aglomerantes de resina de fonelformaldeido con relleno (sílica, carbono, coque pulverizado o barita) conteniendo un catalizador ácido. Estos morteros tienen buena resistencia a la mayoría de los ácidos minerales y soluciones de sales inorgánicas y a soluciones levemente oxidantes, pero son rápidamente atacados por agentes oxidantes fuertes como los ácidos nítricos, ácido crómico y ácido sulfúrico. Presentan un comportamiento satisfactorio en soluciones levemente alcalinas y en muchos solventes, sin embargo tiene poca resistencia a álcalis fuertes.

La resistencia térmica va hasta 175 °C y tolera pH de 1 a 9. El tiempo de uso de este tipo de mortero es corto y necesita estar refrigerado hasta el momento de ser usado.

Los morteros de base poliuretano son muy sensibles a la humedad que pueden contener los agregados debido a que en presencia de poliisocianato producen desprendimiento de CO<sub>2</sub>, lo que obliga a que las cargas de arena deban encontrarse perfectamente secas. Las características de estos morteros son similares a la de los morteros de base epóxica, aunque muy sensibles a la humedad, pero si se trabajan en seco permiten aplicaciones a temperaturas próximas a 0 °C.

### III.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS TABIQUES, BLOQUES Y TABICÓN

Existe una gran variedad de productos utilizados para la construcción de muros y paredes divisorias, y la construcción de éstos dependen en muchas ocasiones de los materiales o materia prima de que se dispone en el sitio. Sin embargo, en este apartado nos referiremos a los productos más conocidos como son: los tabiques o ladrillo, los bloques y el tabicón. La Norma Mexicana NMX-404-1997-ONNCCE, define a estas piezas como:

- **Bloque:** Es un componente para uso estructural de forma prismática, que se obtienen por moldeado del concreto y/o de otros materiales, puede ser macizo o hueco.
- **Tabique (ladrillo):** Es un componente para uso estructural, fabricado de forma prismática con arcillas comprimidas o extruídas, mediante un proceso de cocción o de otros materiales con procesos diferentes.
- **Tabicón:** Es un componente para uso estructural de forma prismática fabricado de concreto u otros materiales.

En el mercado se dispone de una gran cantidad de tamaños, así como de materiales usados para su elaboración, en la tabla III.9 se presentan la clasificación de piezas de acuerdo a los materiales empleados y en la tabla III.10 las especificaciones y tolerancias para poder distinguir unas piezas de otras.

Los tabiques y/o ladrillos deben cumplir con ciertas características como son:

- Ser homogéneos.
- Estar bien moldeado y tener aristas vivas.
- Ser poroso sin exceso, para poder tomar el mortero.



- Tener buena sonoridad al ser golpeado.
- Poder ser cortado con facilidad.

Tipo de pieza	Materiales	Forma
Bloque	Grava – Cemento	Rectangular
	Arena – Cemento	Rectangular
	Barro extruído	Rectangular
	Arcilla recocida	Rectangular
	Otros	Otras
Tabique (ladrillo)	Silicio calcáreo	Rectangular
	Barro extruído	Rectangular
	Arcilla recocida	Rectangular
	Otros	Otras
Tabicón	Grava – Cemento	Rectangular
	Arena – Cemento	Rectangular
	Tepojal – Cemento	Rectangular
	Otros	Otras

Tabla III.9. Clasificación de piezas para construcción de muros de acuerdo a los materiales usados para su elaboración.

Tipo de pieza	Especificación y tolerancia
Pieza maciza	Es aquella cuya área neta sea igual o mayor al 75% de su área total
Pieza hueca	Es aquella cuya área neta es menor al 75% de su área total, pero mayor al 40%
Dimensiones para bloques	Las dimensiones nominales de las piezas deben basarse en un módulo de 10 cm en múltiplos o submúltiplos, estando incluida la junta de albañilería de un 1 cm de espesor. Dichas dimensiones mínimas deben ser de 10 cm de altura, 10 cm de ancho y 30 cm de largo. Las dimensiones de paredes deben ser de 2.5 cm como mínimo. Las tolerancias en las dimensiones de las piezas no deben ser mayores de $\pm 3$ mm en la altura y $\pm 2$ mm en el largo y en el ancho.
Dimensiones para tabiques (ladrillos)	Las dimensiones nominales mínimas deben cumplir con las siguientes medidas: 5 cm de alto, 10 cm de ancho y 19 cm de largo con una tolerancia de $\pm 4\%$ , sin incluir la junta de albañilería.
Dimensiones para tabicones	Las dimensiones nominales mínimas de las piezas deben cumplir con las siguientes medidas: alto 6 cm, ancho 10 cm y largo 24 cm, incluyendo la junta de albañilería. Las tolerancias en las dimensiones de las piezas no deben ser mayores de $\pm 3$ mm en la altura, y $\pm 2$ mm en el largo y en el ancho.
Dimensiones de bloques, tabiques (ladrillo) y tabicones en zonas sísmicas	En zonas sísmicas donde se cuente con un reglamento de construcciones local cuya vigencia sea posterior a los sismos de 1985 y que contenga disposiciones de diseño de sismo – resistencia para estructuras de mampostería, regirán las disposiciones estipuladas en dichos reglamentos de construcción locales referentes a los requisitos de dimensiones nominales mínimas, áreas netas mínimas y espesores mínimos de paredes de piezas macizas y huecas. En caso contrario regirán las especificaciones estipuladas en los incisos 6.1 al 6.4 de la presente norma.

Tabla III.10. Especificaciones y tolerancias para las piezas utilizadas en la construcción de muros.

Una de las propiedades importantes que debemos conocer de las piezas es la resistencia a la compresión, la cual se realiza mediante el ensaye de medio ladrillo en posición horizontal para las piezas macizas y al cual se le aplica una carga de compresión. La pieza debe estar seca y las superficies de apoyo deben pintarse con laca (sustancia resinosa), antes de cabecearla, para impedir la absorción de humedad que pueda alterar su resistencia.

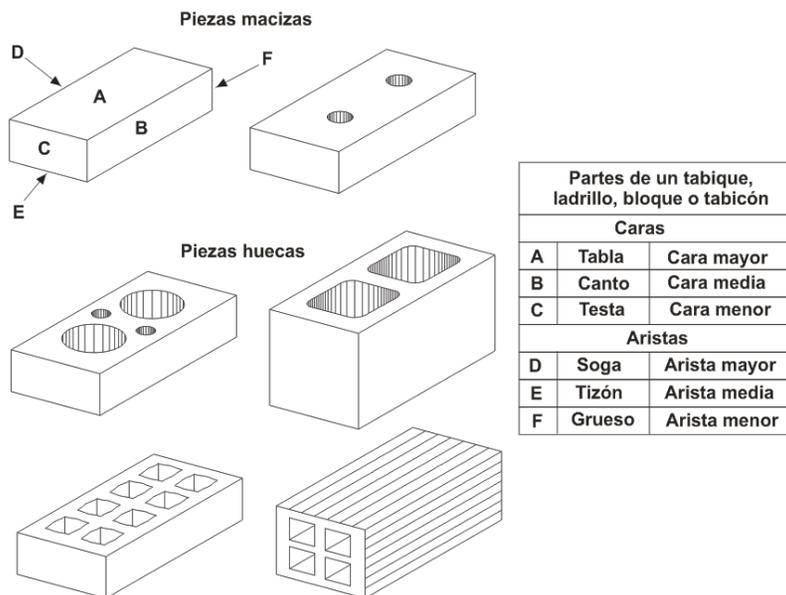
La razón de utilizar sólo la mitad de la pieza radica en que las piezas enteras tienen más irregularidades que puedan dar origen a una mayor dispersión de resultados en los ensayos. En el caso de piezas huecas, bloques y tabiques extruídos se utilizará la pieza entera, ya que los huecos que contienen dificultan la realización del ensaye. En la tabla III.11 se muestran las resistencias en  $\text{kg/cm}^2$ , para diferentes tipos de piezas especificados por la Norma Mexicana NMX-404-1997-ONNCE.

Tipo de pieza	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
Bloques	60
Tabique (ladrillo) recocido	60
Tabique (ladrillo) extruído	60 (hueco horizontal) 100 (hueco vertical)
Tabicón	100

**Tabla III.11.** Resistencia especificada para diferentes tipos de piezas para la construcción de muros.

Otra propiedad fundamental es la absorción, que es la medida de la porosidad, la cual nos indica la posible filtración a través de la pieza y la tendencia a su disgregación. Una pieza porosa es menos resistente que una más densa. La calidad de esta pieza se logra mediante procesos industrializados que, desde luego, pueden variar en las propiedades dependiendo del tipo de materia prima usada, del proceso de elaboración y en su caso del horneado.

La prueba de absorción consiste en sacar cinco mitades de una pieza maciza que se pesan al enfriarse. Posteriormente se sumergen en agua a temperaturas entre 16 °C y 30 °C durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo, las piezas se sacan del agua y son secadas con un trapo húmedo para volverse a pesar inmediatamente. La adsorción se calcula con base en el peso de las unidades secadas por horneado. Al igual que con la prueba de compresión, las piezas deberán usarse enteras en caso de sean piezas huecas, bloques o tabiques extruídos.



**Figura III.7.** Tipos y nombres de las diferentes partes de una pieza utilizadas en la construcción de muros.

La absorción de las piezas presenta variaciones que van del 1 al 25%, aunque en general esta absorción se especifica que debe estar por debajo del 20% para considerarse que es una buena pieza. En la tabla III.12 se presenta la variación de humedades especificad por la Norma Mexicana NMX-404-1997-ONNCCE.

Tipo de pieza	Absorción máxima de agua en % durante 24 horas
Bloques	9 – 20
Tabique (ladrillo) recocido	13 – 21
Tabique (ladrillo) extruído	12 – 19
Tabicones	9 - 20

**Tabla III.12.** Absorción de agua especificada para diferentes piezas de constricción de muros.



La durabilidad es otra propiedad y que tiene que ver con los cambios en las condiciones humedad y temperatura. Esta prueba se evalúa mediante una prueba de ciclos congelación y descongelación. Las piezas son sometidas a muchos ciclos en condiciones saturadas y a varios ciclos de humedecimiento y secado. La pérdida de durabilidad también se ve afectada por su resistencia.

Una prueba que puede realizarse en la obra para observar la calidad de las piezas consiste en frotar dos piezas y observar que no se desmoronen. Otra puede ser golpear la pieza contra un objeto duro y escuchar un sonido metálico. Otra es partir un ladrillo y no se deberá observar manchitas blancas, ya que esto representa contenido de cal, la cual con el tiempo puede disgregarse el material.

Una de las ventajas de la utilización de estas piezas para la construcción, es la absorción de humedad del ambiente con más presión de vapor de agua, trasladarla mediante su red capilar y disiparla en el ambiente con menos presión. Por este motivo son extraordinariamente apropiadas para construcciones destinadas a procesos húmedos, siempre y cuando se permita “respirar” a las piezas.

La conductividad térmica de estas piezas es moderada. Esto quiere decir que a cada sección de una pared, al descender la temperatura, la presión del vapor de agua ha bajado también de tal modo que no se produce agua de condensación. A menudo se tiene el criterio de que la inercia térmica de una pared es demasiado grande y su resistencia térmica demasiado pequeña. Esto se ha mejorado mucho con las piezas huecas. Hay que subrayar la extraordinaria inalterabilidad de las piezas ante cambios de humedad y temperatura.

Otras de las ventajas de estas piezas es aislamiento acústico, entre 5 y 7 veces mayor a un muro hecho de block de similar espesor y entre 10 y 15 veces mayor a un muro de tablayeso.

Entre las desventajas más importantes de la utilización de este tipo de piezas, es la necesidad de un gran consumo de mano de obra.

### III.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Además de los materiales mencionados en los apartados anteriores, en la construcción también intervienen otros diversos metales en mayor o menor proporción, de los cuales es importante conocer sus propiedades, características y cualidades para así fundamentar su empleo en la construcción.

Los metales se definen como elementos químicos que se encuentran en la naturaleza. Algunos, se encuentran en estado puro, como, el oro, pero hay otros metales que están mezclados en minerales compuestos, como, óxidos, silicatos, carbonatos, sulfuros, etc.

Entre las principales propiedades de los metales figuran las siguientes:

- **Maleabilidad:** Es la capacidad de un metal para transformarse en lámina, sin rotura, por la acción de presiones.
- **Ductilidad:** Es la propiedad que tiene un metal de dejarse estirar en hilos.
- **Tenacidad:** Es la resistencia a la rotura por tensión que presenta los metales.
- **Fragilidad:** Es la facultad de un metal de romperse por la acción del choque o por cambios bruscos de temperatura. Muchas veces se confunde la fragilidad con debilidad, siendo propiedades independientes. Un material es frágil cuando su deformación es casi nula antes de romperse.

- **Forjabilidad:** Es la propiedad mediante la cual puede modificarse a la forma de un metal a través de la temperatura.
- **Soldabilidad:** Es la propiedad que tienen algunos metales, por medio de la cual dos piezas de los mismos se pueden unir formando un solo cuerpo.
- **Temple:** Es la propiedad para la cual adquiere el acero una dureza extraordinaria al calentarlo de 600 °C y enfriándolo bruscamente en agua.
- **Oxidación:** Los metales en la construcción se oxidan por acción del oxígeno del aire. Hay metales impermeables en los cuales la pequeña capa de óxido o carbonato que se le forma en la superficie, protege al resto de metal, como es el caso del cobre, aluminio, plomo, estaño y cinc, entre otros. Hay otros metales, como el hierro, que son permeables y la oxidación penetra el metal hasta destruirlo.

Podemos dividir los metales en dos grandes grupos (véase figura III.8):

- **Metales ferrosos**, como, el hierro forjado, el acero, acero inoxidable.
- **Metales no ferrosos**, como, el cobre, el aluminio, el oro, la plata.

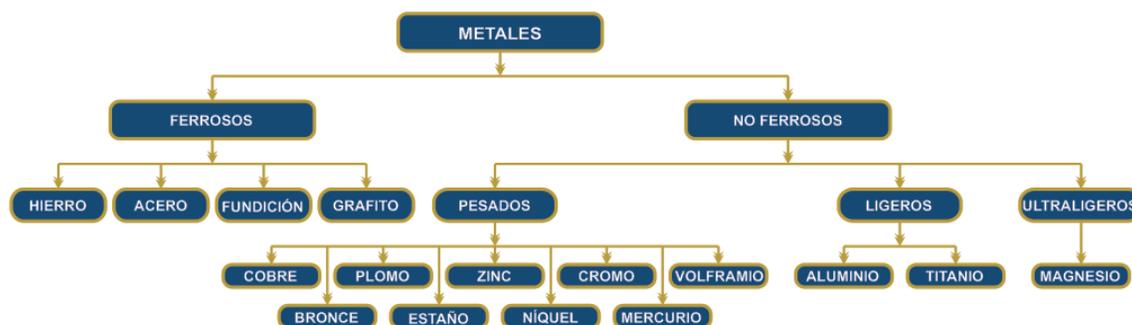


Figura III.8. Clasificación de los metales.

### III.7.1. METALES FERROSOS

Los metales ferrosos contienen como elemento base el hierro. En la industria tienen una aplicación muy amplia: fabricación de herramientas, máquinas, instalaciones.

El hierro químicamente puro es difícil de obtener y tiene poca aplicación por sus bajas propiedades mecánicas. Por ello se usa en forma de aleaciones, que se obtienen combinándolo con otros elementos. Las aleaciones más importantes son las que se logran a base de hierro y Carbono (Fe-C). Según la proporción de Carbono se pueden clasificar en:

- *Hierro:* entre 0,008 y 0,03 % C
- *Acero:* entre 0,03 y 1,76 % C
- *Fundición:* entre 1,76 y 6,67 % C
- *Grafito:* más de 6,67 % C

A mayor % de C se producen las siguientes consecuencias:

- Mayor Resistencia a tracción
- Mayor dureza
- Mayor fragilidad
- Menor ductilidad



### III.7.1.1. Hierro

El hierro químicamente puro (Fe) es un elemento de color gris azulado, que funde a 1,259 °C. No tiene aplicación en la construcción, por lo que relegamos su estudio a la química.

El hierro que se encuentra en el mercado y se utiliza en la industria no es puro, sino una aliación de hierro y carbono.

### III.7.1.2. Acero

Como ya sabemos es una aleación Fe-C con un % de C entre el 0,03 y 1,76. Tiene la capacidad de cambiar sus propiedades mecánicas mediante variaciones controladas de temperatura lo cual se debe a los distintos constituyentes que aparecen según la temperatura.

Los aceros se clasifican Atendiendo a su composición química en:

- Entre 0,1-0,2 % de C. Acero extrasuave
- Entre 0,2-0,3 % de C. Acero suave
- Entre 0,3-0,4 % de C. Acero semisuave
- Entre 0,4-0,5 % de C. Acero semiduro
- Entre 0,5-0,6 % de C. Acero duro
- Entre 0,6-0,7 % de C. Acero extraduro

Las aplicaciones de estos aceros son las siguientes:

- *Extrasuave y suave:* Se usa para hacer clavos, arandelas, tornillos, bisagras, carrocerías de coches, vigas (con distintos perfiles: T, doble T, en ángulo, en U). Se trabaja con máquina fácilmente.
- *Semisuave y semiduro:* En martillos, hachas, llaves inglesas, llaves de casas, cadenas, ruedas de engranajes, destornilladores, etc.
- *Duro y extraduro:* En formones, brocas, serruchos y en general herramientas de corte.

Algunos aceros además del Fe y C, contienen otros elementos en distintas proporciones. Cada uno de esos elementos mejora las propiedades mecánicas y térmicas de los aceros. Por ejemplo los aceros inoxidables son aleaciones de cromo y el acero galvanizado se obtiene aleándolo con cinc. Algunas aportaciones de elementos químicos al acero son las siguientes:

- *Níquel:* Aporta gran resistencia a tracción y a la corrosión.
- *Cromo:* Aporta gran dureza, tenacidad y resistencia a corrosión y a la abrasión.
- *Tungsteno:* Aporta gran dureza a altas y bajas temperaturas.
- *Vanadio:* Aporta dureza y resistencia a la tracción y al desgaste.

### III.7.1.3. Fundición

Las fundiciones de uso más frecuente suelen tener entre un 2,5 y un 4,5 % de carbono y pequeñas cantidades de silicio, manganeso, azufre y fósforo. Sin embargo, no es la cantidad de carbono lo que caracteriza las fundiciones, sino la forma en que dicho elemento se encuentra. La propiedad más importante de las

fundiciones es la de ser fácilmente fusibles y permiten obtener piezas sumamente complicadas a través de moldes. A diferencia del acero no puede ser trabajado por forja o laminación.

La fundición se puede clasificar según su composición y estructura en:

- *Fundiciones ordinarias.* Constituidas solamente por hierro y carbono:
  - *Fundición gris:* La mayor parte del carbono que contiene se encuentra en forma de láminas finas de grafito. Recibe el nombre de gris por el color que presenta su superficie de rotura. No es muy dura y se emplea en segunda fusión para moldería, para piezas de diseño complicado y muchas veces para su conversión en acero (afino).
  - *Fundición blanca:* Casi todo el carbono se combina con el hierro y no aparecen láminas de grafito. Su superficie de rotura es blanca. Es más dura pero más frágil que la gris, por poseer cementita (constituyente duro). Se suele emplear para su conversión en acero (afino) o en fundiciones maleables.
  - *Fundición atruchada.* Es intermedia entre la blanca y la gris.
- *Fundiciones aleadas.* Contienen además del hierro y el carbono otros elementos de aleación como: níquel, cromo, molibdeno, aluminio, silicio, manganeso... que les confieren propiedades especiales: alta resistencia a tracción, al desgaste, a altas temperaturas o a la corrosión.

Sin embargo, la fundición también se clasifica de acuerdo a su elaboración:

- *Fundición de primera fusión o arrabio.* Es la que se obtiene en los altos hornos. Puede ser blanca, gris, atruchada o aleada. Se usa en forma de lingotes para obtener fundición de segunda fusión, para fabricación de *acero* o *transformación en fundición maleable*.
- *Fundición de segunda fusión.* Se obtiene a partir de la fundición gris (de 1ª fusión), fundiendo el nuevo lingote en un horno denominado cubilote. Se usa para obtener piezas de maquinaria, especialmente las que no necesitan propiedades mecánicas muy elevadas pero son de formas complejas.
- *Fundición maleable.* Se obtiene a partir de fundición blanca que se somete a tratamientos térmicos para aumentar su ductilidad y maleabilidad. Se emplea para piezas que han de ser tenaces y tener al mismo tiempo formas complejas.

### III.7.2. METALES NO FÉRRICOS.

Los metales no ferrosos se clasifican atendiendo a su densidad en:

- Pesados.
- Ligeros.
- Ultraligeros.



Dependiendo de sus características, estos materiales sustituyen con ventaja a los derivados del hierro en múltiples aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, resultan más caro de obtener debido a diversas razones, entre las que destacan las siguientes:

- La baja concentración de algunos de estos metales es sus menas (parte útil de la extracción metalúrgica).
- La energía consumida en los procedimientos de obtención, y afino, ya que, la mayoría de los casos, se trata de procesos electrolíticos para los que se emplea energía eléctrica.
- La demanda reducida, que obliga a producirlos en pequeñas cantidades.

Los metales no férricos de mayor aplicación industrial son el cobre y sus aleaciones: el aluminio, el plomo, el estaño y el cinc. Otros como el mercurio y el wolframio, se aplican en ámbitos industriales muy específicos. Los demás metales casi nunca se emplean en estado puro sino formando aleaciones. Es el caso del níquel, el cromo, el titanio o el manganeso.

#### III.7.2.1. Aluminio

Es un metal blanco y ligero, es blando y muy maleable. No se altera con el aire, ni se descompone con el agua. Tiene muy buena conductividad tanto eléctrica como térmica.

Se utiliza en la construcción para ventanas, puertas, debido a las posibilidades de tratar y colorear sus superficies lo que lo hace un material importante para acabados. También es utilizado en la confección de conductores eléctricos y en la alimentación, en la fabricación de instrumentos para la cocina. El aluminio también se emplea en forma de plancha, en el recubrimiento de techos.

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por la relativamente baja densidad ( $2,700 \text{ kg/m}^3$ ), elevadas conductividades eléctricas y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. A muchas de estas aleaciones se les puede dar forma diferente con facilidad debido a su alta ductilidad; esto es evidente en el aluminio puro que se puede convertir en papel y enrollar. El aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es la baja temperatura de fusión  $660^\circ\text{C}$ , que restringe su campo de aplicación.

La resistencia mecánica del aluminio se logra por acritud o por aleación; sin embargo ambos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión. Los principales elementos de aleación son el cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc.

#### III.7.2.2. Cobre

Es un material de color rojizo. Es blando, maleable y tenaz. No se oxida al contacto del aire seco, pero al aire húmedo en presencia de anhídrido carbónico le hace cubrirse con una capa de sulfato de color verde azulado, la cual le protege de la oxidación. Es un excelente conductor de la electricidad. Adquiere un olor desagradable cuando se le frota.

Tiene muy poca aplicación en la construcción debido a su costo. Su mayor uso es en la mecánica debido a sus propiedades químicas, eléctricas y térmicas. Se emplea en electricidad en la obtención de bobinados pararrayos y cables. Las principales formas comerciales son en tubos y alambres de diferentes diámetros y espesores.

#### **III.7.2.3. Bronce**

Es una aleación de cobre y estaño donde el cobre se encuentra en una proporción de 75 a 80%. Tiene color amarillo y resistente a los agentes atmosféricos y a los esfuerzos mecánicos. Se utiliza en la fabricación de armas, medallas, campanas y estatuas. En la construcción se emplea en grifos, tubos y uniones.

#### **III.7.2.4. Latón**

Es una aleación de cobre y zinc. El zinc debe de estar en proporción menor de 45%, porque en proporción mayor el latón disminuye sus propiedades mecánicas. Tiene color amarillo y es resistente a la oxidación. No es atacada por el agua salada, razón por la cual se usa en la marina. Se emplea en ornamentación en la fabricación de tubos, en soldadura y en fabricación de alambres.

#### **III.7.2.5. Zinc**

Es de color blanco azulado, de brillo metálico y cristalino con una densidad de  $7,140 \text{ kg/m}^3$ . Es resistente a los agentes atmosféricos al recubrirse con una capa delgada de hidróxido que lo protege de la oxidación.

Tiene buena resistencia mecánica, por lo que se podría emplear en construcción como elemento resistente. Sin embargo, su mayor uso esta como elemento protector su aplicación más típica en la construcción es el revestimiento de techos. También se emplea en el revestimiento del hierro y de la madera.

#### **III.7.2.6. Plomo**

Es un metal de color blanco azulado, pero en contacto con el aire adquiere un color gris al recubrirse de una capa de óxido. Es maleable, dúctil, flexible y muy blando, al extremo que es rayado por la uña. Se funde a una temperatura de  $327^\circ\text{C}$ . Tiene una densidad muy alta  $11,500 \text{ kg/m}^3$ . El ácido nítrico lo ataca y lo disuelve.

Los cambios de temperatura lo agrietan, en consecuencia no se usan los tubos de plomo en la conducción de agua o vapor caliente.

Después del hierro, el plomo es el metal de mayor uso, pero en la construcción su empleo es limitado debido a su poca resistencia. Se utiliza en la fabricación de láminas, en la fabricación fusibles eléctricos, tubos y como elemento de reparación en los cruces de juntas de dilatación. En el comercio se encuentra bajo diferentes formas. Sus principales son lingotes, placas, alambres, tubos y balas.

#### **III.7.2.7. Estaño**

Es de color blanco de plata, es poco resistente mecánicamente. Al doblar una barra de estaño rechina, debido al rompimiento de sus cristales, cuyo ruido es llamado grito del estaño. Es resistente a los agentes atmosféricos a temperatura ordinaria, pero al elevarse la temperatura tiende a oxidarse.



En construcción el estaño se usa en el recubrimiento de objetos metálicos, principalmente en las plancha de hierro para formar la hojalata. También se utiliza en soldaduras y en formas de tubos, aunque estos resultan de alto costo.

### III.8. PINTURAS

#### III.8.1. LAS PINTURAS DE AGUA

Citemos en primer lugar los preparados de cal, compuestos esencialmente por óxido de calcio (cal apagada) de consistencia pastosa. La pasta se aplica agregándole agua para formar una lechada muy fluida. Para trabajar en paramentos exteriores se añade a la mezcla cloruro sódico (sal común), en una proporción de 35 gr por cada 10 kg de lechada. La sal tiene la misión de aumentar la resistencia de la película que se forma al fraguar, haciendo manos quebradiza y más insensible a la acción de las inclemencias atmosféricas.

El color natural de la pintura a la cal, al secar, es el blanco intenso, de gran vivacidad. Puede colorearse con la adición de pigmentos terrosos, con los que se consiguen tonos pastel de matices suaves, ya que el principio cáustico del preparado se “come” los colores y no permite que estos sean puros y contrastados.

En el mismo grupo están las pinturas al silicato, que son un compuesto acuoso que lleva en adición pigmentos colorantes, sulfato de bario, o carbonato de cal, utilizados como carga para dar cuerpo a la pintura, y una solución concentrada de silicatos de sosa o de potasa, o de ambas a la vez. En ocasiones incorpora fluorosilicato de magnesia.

Con un grado exacto de concentración los compuestos silicatos originan una película insoluble y extraordinariamente resistente.

Las pinturas al cemento están constituidas, fundamentalmente, por cemento blanco especial, pigmentos colorantes y pequeñas cantidades de diferentes adictivos, que varían según cada producto y marca, de características similares a la tradicional caseína. La mezcla, una vez seca, forma una capa impermeabilizando que proporciona una elevada protección al soporte contra la intemperie y las humedades.

#### III.8.2. PINTURAS SINTÉTICAS

Los esmaltes celulósicos, erróneamente llamados por algunos esmaltes sintéticos, utilizan como aglomerantes resinas celulósicas, producto derivado de la celulosa vegetal sometida a un proceso de transformación para convertirla en un material plástico. Se combinan actualmente, con otras resinas también de síntesis, como por ejemplo, las alquílicas, melamínicas, acrílicas, epóxicas, etc., con lo que se mejoran las propiedades mecánicas y su poder de resistencia ante la acción de los agentes meteorológicos.

Como características destacables, la familia de pinturas celulósicas ofrece una gran rapidez de secado y de endurecimiento, una notable resistencia a los hidrocarburos y la posibilidad de aplicación por medio de pistola proyectora. Poco económica, es la pintura que tradicionalmente se usa para impermeabilizar y decorar superficies de madera, como puertas, ventanas y sus marcos, persianas, vallas, etc.

El caucho clorado o clorocaucho es un tipo de pintura a partir de la disolución del caucho natural o sintético en tetracloruro de carbono, sometida posteriormente a un tratamiento con cloro. Corrientemente se modifica su acción por la adición de otras resinas asimismo sintéticas, tales como las alquílicas. Si disolvente es el agua.

Como principales propiedades podemos citar: su perfecta adherencia al hierro y otros soportes metálicos; su rápido secado; su excelente resistencia al agua y las humedades; y no afectarle la exposición a la luz solar. Pintura de características protectoras y aislantes ante la lluvia, es además fungicida, evitando la anidación de hongos y de otros microorganismos.

Tiene aplicación en superficies de madera, metal, cemento, concreto y fábrica de ladrillo.

La familia de las resinas vinílicas componen un grupo muy interesante, porque emulsionadas en agua constituyen las denominadas pinturas emulsión, más conocidas en el mercado por el nombre popular y genérico de pinturas plásticas. Estas cuyo disolvente es el agua, presentan, como propiedades comunes, una gran facilidad de aplicación, carencia de olor, rapidez en secar, elevada flexibilidad de la película que forman y alta resistencia a las humedades. Al mismo tiempo, las pinturas vinílicas son permeables a la transpiración.

La familia de los acrílicos comprenden barnices transparentes y esmaltes opacos en emulsión, cuyos aglomerantes han sido obtenidos por polimerización de ésteres de los ácidos acrílicos y metacrílicos. También utilizan el agua como disolvente.

Se presentan en diversas variedades, con aplicación en los campos industrial, artístico y de la construcción. Su buena adherencia sobre cualquier clase de soporte, su rápido endurecimiento, su escasísima alteración ante el paso del tiempo, su extraordinaria resistencia a la luz y a la acción de la lluvia, así como la facultad que posee de poder utilizarse directamente, sin imprimación, son sus principales especificaciones. Se usan para la formulación de muchos compuestos de sellado y barnices protectores contra las humedades, así como en pinturas decorativas para fachadas, que reúnen las mencionadas ventajas.

Los copolímeros estireno-butadieno constituyen la base de otra familia de pinturas apropiadas para la fabricación de recubrimientos mates, fluidos, especialmente indicados para fachadas. Tienen una excelente resistencia a la acción de los agentes climatológicos. Se destacan igualmente por su elevado poder de adherencia.

Los esmaltes de cumarona presentan un índice de acidez muy bajo, una buena resistencia al calor y a la agresión de los agentes ambientales. Combinados con resinas alquídicas se utilizan para la preparación de pinturas metálicas de aluminio para exteriores, así como para pinturas anticorrosivas y de protección a las humedades.

La familia alquídica constituye la base de las resinas de poliéster, modificadas con glicerina en ácido graso, que dan lugar a la fabricación de las pinturas gliceroftálicas, cuyo nombre popular es el de oleorresinas, con un muy amplio campo de actuación, pero fundamentalmente del tipo industrial y decorativo. Estas pinturas se utilizan para fachadas sustituyendo a las tradicionales pinturas al aceite en recubrimientos exteriores, con la ventaja de ser mucho más rápidas en el secado, ofrecen un endurecimiento y resistencia mayor de la película superior, carece del desagradable olor que se desprende cuando es aplicada y presenta una gran gama de colores.

Otra familia interesante es la integrada por los barnices de poliéster, fabricados a partir de resinas de poliéster no saturados, que para endurecer necesitan la colaboración de un agente catalizador, por lo general un ácido igualmente no saturado.

De gran contenido resinoso, los barnices al poliéster endurecen por completo en profundidad, por lo que resulta un tipo de recubrimiento muy indicado para sellar y hacer muy resistente las superficies de materiales porosos. Por ejemplo, la madera, el yeso, la fábrica de ladrillo, etc.



Los barnices epóxicos, cuyo principal componente es una resina epoxi, constituye otra familia. Pueden secarse al aire por intermedio de un agente catalizador; en tal caso se suelen combinar con otras resinas también sintéticas, tales como poliamidas, malaminas, urea-formol, fenoles, acrílicos, etc. Son productos muy adherentes, flexibles y resistentes, que tienen distintas aplicaciones según el tipo de endurecedor o modificador empleado. En el campo de la construcción son indicados compuestos epóxicos para la protección anticorrosiva en general.

La familia de los esmaltes de siliconas se obtienen a partir del silicio y un radical, que puede ser metilo, etilo, vinilo, fenilo, etc. Estos preparados, que en un principio se utilizaban para la protección de superficies metálicas sometida a la acción de elevadas temperaturas, por lo que constituían la base principal de preparados anticalóricos, con la adición de resinas alquídicas mejoran sus cualidades de resistencia a la intemperie y dan paso a barnices selladores de importante acción impermeabilizadora. Con ellos se fabrican preparados especiales para recubrimiento protector de paramentos exteriores, evitando las humedades y la desintegración de las capas superficiales de los muros de fachada.

Y por último, citaremos la familia de los esmaltes y barnices poliuretánicos, basados en resinas de poliuretano, que se forman por la adición de un poliisocianato y de un compuesto hidroxílico, por lo general resinas de poliéster saturado, y a veces una resina epoxi, para lograr una gran resistencia química.

Según su composición, estos compuestos de poliuretano pueden ser duros o blandos, lo que permite ser aplicados sobre soportes más variados. Presentan una gran resistencia a la acción de la luz y a los agentes atmosféricos, que no alteran la superficie pintada o barnizada al cabo de muchos años de su aplicación. Debe destacarse, asimismo, su comportamiento impermeable ante el agua y su resistencia a la agresión de gran número de productos químicos. Su dureza, tenacidad y elasticidad las hace inatacables por la abrasión, choques e impactos. También ofrecen excelentes propiedades de aislamiento eléctrico.

En la industria de la construcción, estos preparados tienen su principal utilización en el acabado de pintura sobre fachadas de concreto, en donde se aplica como recubrimiento que asegure una protección eficaz contra las humedades y toda clase de agresiones ambientales.

### III.9. CARACTERÍSTICAS DE LOS VIDRIOS

Es conocido el empleo de láminas de vidrio como, por ejemplo, en ventanas, espejos, vidrio pulido, vidrio impreso, vidrio colado, etc. Este material ha pasado ha ser últimamente un elemento muy usado en la construcción. Se ofrece en el mercado con diversas estructuras y calidades.

El vidrio es una masa rígida y dura, tiene una fundición amorfa de arena de cuarzo (dióxido de silicio), fundentes (sosa y pasta) y endurecedores (calcita). El vidrio normal empleado en la construcción es un vidrio de cal de sodio con un peso específico de  $2,500 \text{ kg/m}^3$ . El vidrio de plomo tiene un peso específico de  $3,000$  a  $6,000 \text{ kg/m}^3$ .

Este material es más o menos quebradizo según la diferencia de resistencia a la compresión y a la tensión. El vidrio tiene una resistencia a la compresión de aproximadamente  $4,000$  a  $12,000 \text{ kg/m}^2$ , mientras que su resistencia a la tensión va de  $300$  a  $900 \text{ kg/m}^2$ .

Una de las características principales de los vidrios a tomar en cuenta, es la dilatación térmica, ya que esto puede provocar que el vidrio se rompa o quiebre. La dilatación del vidrio debido al calor está aproximadamente entre  $6 \times 10^{-6}$  y  $9 \times 10^{-6}$ , y es por consiguiente, prácticamente igual a la del concreto poroso.

La capacidad de transmisión térmica es otra de las características importantes a considerar, esta capacidad está comprendida entre 0.7 y 0.8 Kcal/hm °C. Por tanto, en el diseño de edificios se debe tomar en cuenta la forma de transmisión del calor, el cual siempre se produce un movimiento desde el espacio más caliente hacia uno menos caliente. Por ejemplo, en temporada de invierno, el movimiento se da del interior al exterior del inmueble, debido a la calefacción existente en el interior perdiendo dicho calor. Mientras que en verano, se produce el movimiento de calor del exterior al interior, debidas a la refrigeración del inmueble.

El calor se transmite a través del vidrio de tres formas:

- Por conducción a través de la superficie.
- Por radiación, debida a la transparencia del material.
- Por conversión superficial.

Cuando la radiación solar incide sobre un vidrio, una parte de la misma es reflejada hacia el exterior, otra parte pasa directamente hacia el interior y otra es absorbida por la masa del vidrio. De este última, 2/3 partes se irradian hacia el exterior y el restante 1/3 pasa hacia el interior.

Para mejorar el aislamiento térmico de una superficie vidriada se emplean dos o más vidrios separados entre sí por una cámara de aire seco y estanco, esto minimiza el calor que se transmite hacia el interior en un 25% aproximadamente. Sin embargo, cabe aclarar que el aislamiento térmico también depende del tipo de vidrio usado.

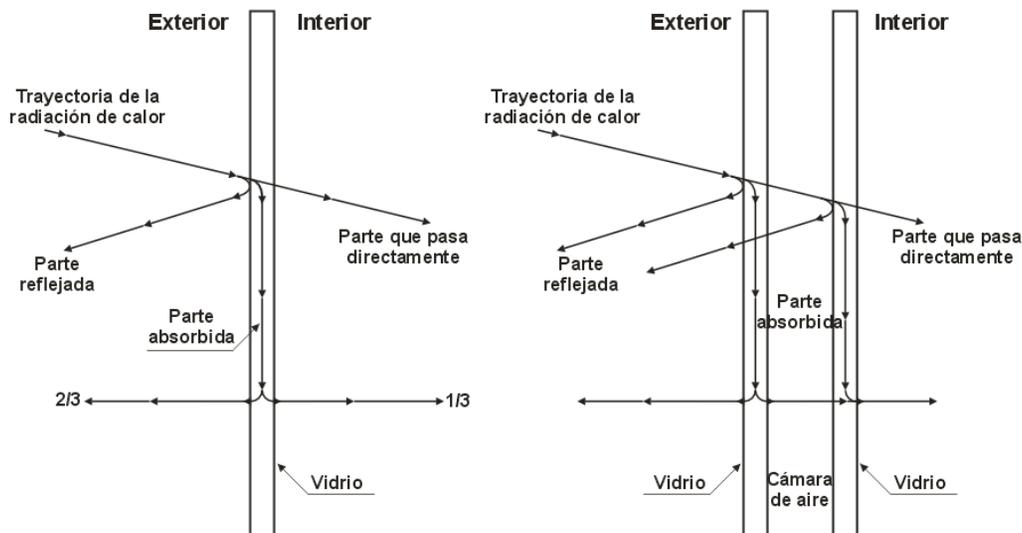


Figura III.9. Trayectoria de la radiación del calor en los vidrios.

El aislamiento acústico se puede resolver con la amplia variedad de vidrios y técnicas de colocación que se tienen en la actualidad. En general, podemos decir que, los ruidos graves (bajas frecuencias) son más difíciles y costosos de aislar con vidrio que los sonidos agudos (altas frecuencias).

En el mercado, como ya se menciona, existe una gran cantidad de tipos de vidrios, con diferentes espesores y tamaños, sin embargo, la elección de éste quedará determinado por las solicitaciones a las que estará sometido, por ejemplo, la presión del viento, la radiación solar y el área de riesgo.



### III.9.1. VIDRIO OPACO

El vidrio opaco cuando se emplea en fachadas hay que cuidar que este ventilado por su cara posterior. Hay también vidrios opacos que en lugar de estar coloreados o bien esmalteados al fuego tienen una película opaca de color en el centro. En cualquiera de estos casos hay que elegir un color que absorba el mínimo posible de calor solar, pues debido al sobrecalentamiento y a las tensiones de dilatación existe el peligro de las rupturas. Naturalmente los colores claros son los más indicados.

### III.9.2. VIDRIO COLOREADO

Los vidrios coloreados absorben (salvo casos especiales) mayor parte de calor solar que los vidrios opacos. Entre la radiación la parte más importante es la de los rayos infrarrojos, esto hace que estos cristales se calienten más y se dilaten; cuando están impedidos por un montaje adecuado, el vidrio se quiebra.

Además de los marcos, lo que puede causar tensiones y rupturas es la diferencia de temperaturas debidos a una distribución irregular dentro de un mismo cristal en zonas de sombra y de sol.

Los vidrios amarillos y rojos en la mayoría de los casos absorben completamente los rayos ultravioleta y gran parte de la banda azul de la escala cromática, por lo tanto, son adecuados para almacenes destinados a mercancías sensibles a la luz.

Los vidrios grises y violetas disminuyen el paso de los rayos visibles. Los vidrios azules y verdes, coloreados con óxido de hierro, absorben una parte importante del sector infrarrojo y por lo tanto se calientan fácilmente.

### III.9.3. VIDRIO SECURIZADO O VIDRIO TEMPLADO

Al principio se utilizaba este vidrio en los automóviles, pero posteriormente ha sido utilizado de una manera progresiva en la construcción. Se suministra en uno, dos o más láminas de vidrio unidos y securizados.

De este vidrio de alta calidad se pueden fabricar elementos y paramentos completos de separación, por ejemplo, puertas, muros divisorios, etc.

El vidrio securizado o templado en caso de ruptura se fragmenta totalmente en pequeños trozos, sin aristas cortantes. Roto, el paño pierde capacidad portante e integridad como cerramiento. Este vidrio presenta propiedades estructurales y una resistencia mecánica de 4 a 5 veces mayor que el vidrio normal. Es manufacturado a medida y una vez suministrado no se puede cortar ni agujerear. Las puertas sin marcos de este material obedecen no sólo a necesidades estéticas sino a exigencias de seguridad.

Al aumentar el espesor y número de laminas de vidrio se puede llegar al llamado "vidrio blindado" que se pueden utilizar como material antirrobo. El vidrio templado o securizado, debido a su especial tratamiento no requiere ventilación en la parte posterior, pero es recomendable para evitar condensaciones.

### III.9.4. VIDRIOS AISLANTES

Quando se requiere disminuir el calor de radiación y a la vez amortiguar la iluminación se emplea vidrio securizado coloreado. Por lo general son de color gris, formado por dos o tres láminas y una lámina superficial aislante, estos vidrios son conocidos como "vidrios

antideslumbrantes”. Disminuyen la transmisión de los rayos infrarrojos y de los rayos visibles. Estos vidrios se calientan poco.

También hay cristales aislantes formados por un sándwich que contienen un su interior una malla de alambre fina que, en caso de ruptura, actúa como elemento de retención de los trozos de vidrio rotos, impidiendo temporalmente su caída.

El vidrio laminado es otro tipo de vidrio aislante, este vidrio está fabricado con dos o más láminas de vidrio adheridos a una lámina plástica de PVB que actúa como agente de unión entre los mismos, manteniendo la integridad del cerramiento, sin disminuir la visión. Presenta propiedades de seguridad y protección que, en caso de ruptura, lo tornan muy difícil de traspasar, permaneciendo los trozos de vidrio rotos adheridos a la lámina plástica.

La existencia de estos materiales tan apropiados para aislamiento se deben tener presentes en el momento de proyectos especiales.

### **III.10. CONCLUSIONES**

Es indispensable el conocimiento de las propiedades y características de los materiales usados en la construcción, para que de esta forma estemos en posibilidades de emplearlos de forma óptima en los diferentes elementos que constituyen la construcción. Además, el conocer las propiedades del material utilizado y las características que le infiere el medio que le rodea, nos ayuda a evaluar los efectos a los que estará sometida, para que de esta forma, podemos predecir su comportamiento.

El conocer las propiedades físicas tales como: resistencia ante esfuerzos, deformabilidad física por cambios temperatura, envejecimiento, adsorción de humedad, entre otras, nos ayudará a la selección del material apropiado para el fin perseguido. Así tenemos, que para el proyectista, el conocer las propiedades de los materiales es fundamental, ya que esto incidirá directamente en los cálculos y fórmulas utilizadas para el dimensionamiento de los elementos del proyecto.

El conocer las propiedades de los materiales nos servirá, para una adecuada combinación de los mismos, es decir, seleccionar aquellos materiales que sean compatibles y que cumplan con las características requeridas. Así mismo, el conocer las propiedades de los materiales nos ayudará a que tengamos el conocimiento para cambiar o conferirle nuevas propiedades y características para que se adapten al proyecto.



## CAPÍTULO IV

# AGENTES Y MECANISMOS DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

### IV.1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; gracias a este medio se han logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio; sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura.

El origen y acción de los daños en las estructuras de concreto por acciones del medio ambiente se reflejan en la vida útil de la estructura, provocando daños o lesiones con síntomas inherentes al tipo de acción y agresor actuante, es decir, adquiere enfermedades la estructura por causa y acción del medio ambiente.

La durabilidad inadecuada se manifiesta en sí misma por el deterioro, producto de factores externos o causas internas dentro del concreto mismo. Las acciones pueden ser mecánicas, físicas, químicas o biológicas.

El ataque externo ocurre principalmente a través de la acción de iones agresivos, como cloruros, sulfatos o bióxido de carbono, además de muchos líquidos y gases naturales o industriales. Las acciones que dañan pueden ser de diversa clase y pueden ser directas o indirectas.

Por tal motivo, el concreto es un material que está expuesto en cada uno de sus procesos (desde su dosificación y fabricación, hasta su manejo, colocación y curado), a diferentes factores ambientales y de servicio y sujeto a diversas técnicas durante su colocación. Estas circunstancias no siempre son las más eficaces, adecuadas y correctas, por lo que el concreto es susceptible de reparaciones posteriores a su colocación para aumentar y mantener su expectativa de vida útil.

Una vez que se manifiestan o detectan los problemas o las situaciones que los pueden generar, se debe proceder a la identificación del daño o lesión y sus respectivas causas y a la selección y aplicación de la técnica correctiva más eficaz y económica, por tal motivo es de primordial importancia conocer la tipología de las lesiones porque es el punto de partida de todo estudio patológico.

Se debe observar que los procesos físicos, químicos, mecánicos o biológicos del deterioro actúan de una manera sinérgica. Aquí vale la pena hacer notar que el deterioro del concreto raramente es producto de una causa aislada: el concreto puede ser con frecuencia satisfactorio a pesar de algunas características inconvenientes pero, con un elemento adicional adverso, puede ocurrir el daño. Por esta razón a veces es difícil asignar el deterioro a algún elemento particular, pero la calidad del concreto casi siempre entra en el cuadro. Realmente, con la excepción del daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad comprenden el transporte de fluidos a través del concreto. Por esta razón, la consideración de la durabilidad requiere una comprensión de los fenómenos involucrados.

El conjunto de lesiones que pueden aparecer en una construcción es muy extenso debido a la diversidad de materiales y unidades constructivas que se suelen utilizar. Pero, en líneas generales, se pueden dividir en cuatro grandes familias en función del carácter y la tipología del proceso patológico (véase figura IV.1):

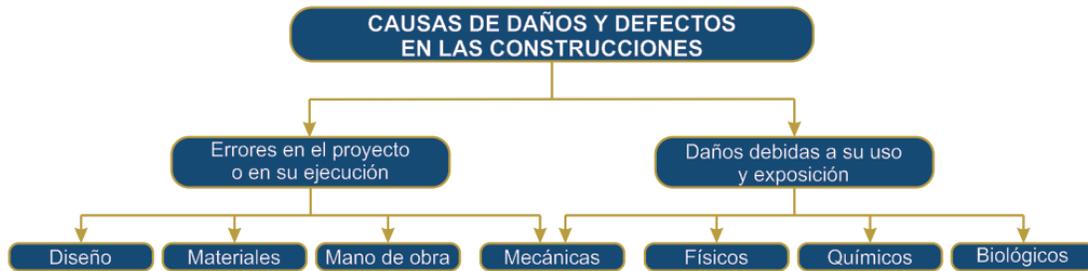


Figura IV.1. Causas de daños y defectos en las construcciones de concreto.

- **Acciones físicas.** Las acciones físicas que se refieren esencialmente a los cambios volumétricos que experimenta el concreto, como consecuencia de cambios de humedad (agua líquida, vapor de agua, escarcha, hielo) y/o de temperatura (frío, calor, fuego), pero también las acciones físicas hacen referencia a las variaciones de su masa (cambios de peso unitario, porosidad y permeabilidad).
- **Acciones mecánicas.** Dentro de los factores de deterioro imputables a las acciones mecánicas están la deformación lenta (fluencia), las sobrecargas y deformaciones impuestas (fisuras estructurales, deflexiones y movimientos excesivos, imprevistos o fortuitos y las fracturas y los aplastamientos), los impactos, las vibraciones excesivas y los daños por abrasión (frotamiento, rozamiento, percusión, erosión y cavitación) que están relacionadas con el uso que se da a la estructura.
- **Acciones químicas.** Como factores de deterioro que se asignan a las acciones químicas están, el ataque de ácidos, la lixiviación por agua blandas, la carbonatación, la formación de sales expansivas (ataques de sulfatos) y la expansión destructiva de las reacciones álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.
- **Acciones biológicas.** Como consecuencia de la bioreactividad que ofrecen las superficies de concreto y de mortero, aparentemente por la disminución del pH sobre sus mismas superficies, se dan las condiciones para la colonización, establecimiento y desarrollos de microorganismos de origen animal o de origen vegetal, que también afectan la durabilidad del concreto.

Es necesario mencionar en esta parte, que los daños no se presentan en todas las zonas por igual, pero cabe señalar que la tipología de éstos es similar a los diferentes elementos que han sido atacados por una misma causa o acción, variando sólo cuantitativamente.

Aquí cabe hacer la aclaración, entre fisuras, grieta y falla. Se llama grieta a la hendidura estrecha y prolongada que se produce en una superficie de una obra de fábrica, tanto si es de ladrillo como de concreto así como a la capa de material aplicado como revestimiento, cualquiera que sea su causa. Por lo general, se considera grieta cuando la separación entre sus bordes supera el milímetro o milímetro y medio; antes de llegar a esta anchura el defecto se denomina fisura. Se acepta como límite de una grieta, son independencia de su importancia, que en ningún caso llega a dividir totalmente en dos partes el cuerpo dañado. En este último caso, la presencia de tal lesión se considera un síntoma de gravedad y la grieta toma el nombre de falla de un muro o de tabique.

## **IV.2. ERRORES EN EL PROYECTO O EN LA EJECUCIÓN**

La posibilidad de que las lesiones se produzca como consecuencia de fallos en el proyecto o bien en errores de interpretación de los mismos, o en su desarrollo práctico que pueden deberse a múltiples circunstancias difícilmente encasillables, hace muy difícil (por no decirlo imposible) intentar siquiera una clasificación, es decir, que la responsabilidad debe imputarse al arquitecto, proyectista o al constructor ejecutor de la obra. En algunos casos puede hablarse de imprudencia, en otros de desconocimiento o falta de capacidad técnica; en ocasiones habrá un descuido como origen del fallo, una negligencia, un olvido, etc.

### **IV.2.1. FALLAS DURANTE LA CONCEPCIÓN Y DISEÑO DEL PROYECTO**

Como se ha visto en los capítulos precedentes, la planeación y diseño de una estructura no sólo debe basarse en su función, sino también en las condiciones ambientales y en la vida estimada de servicio. Para ello, es indispensable que los profesionales que intervienen en la fase de diseño del proyecto, sean consecuentes no sólo en aplicar métodos de cálculo altamente desarrollados; sino también, en considerar los aspectos tecnológicos que aporta la Ingeniería de materiales.

Debido al desmesurado avance que han tenido los métodos de cálculo de estructuras, que consideran diversas hipótesis de carga, normas, cálculos, dimensiones y detalles y tienden a optimizar los recursos disponibles en un proyecto de construcción, hoy en día hay una mayor inclinación hacia construir estructuras más esbeltas y algunas veces con factores de seguridad más bajos (que no ponen en riesgo la capacidad estructural, pero si pueden afectar la durabilidad).

Pero las fallas por concepción y diseño de una estructura pueden darse por muchas razones, entre ellas:

- Por ausencia de cálculos o por no valorar todas las cargas y condiciones de servicio.
- Por falta de un diseño arquitectónico apropiado. El diseño estructural debe incluir los conceptos arquitectónicos y viceversa.
- Por falta de drenajes apropiados (eliminar el agua es eliminar el problema). El desagüe por el concreto hay que evitarlo, lo mismos que la presencia de agua estancada. Del mismo modo, deben reducirse las salpicaduras y los ciclos de humedecimiento y secado.
- Por no proyectar juntas de contracción, de dilatación o de construcción. Hay que entender que el diseño y construcción de estructuras de concreto implica la presencia de fisuras y grietas, que deben ser controladas mediante la disposición del llamado «acero de retracción y temperatura» y/o juntas.
- Por no calcular de manera apropiada todos los esfuerzos y/o confiarse de los programas de computadora.
- Por no dimensionar apropiadamente los elementos estructurales y/o no disponer apropiadamente del refuerzo.
- Por imprecisiones en los métodos de cálculo o en las normas.

- Por no especificar la resistencia y características apropiadas de los materiales que se emplean (concreto y acero).
- Por tolerar deformaciones excesivas en el cálculo.
- Por falta de detalles constructivos en los planos.

#### IV.2.1.1. Asentamientos del terreno.

Cuando hay un diseño inapropiado de la cimentación de una construcción, pueden darse movimientos diferenciales dentro de la estructura. Si el movimiento diferencial es relativamente pequeño, los problemas de fisuración probablemente sean de naturaleza visual. Pero, si se presentan asentamientos diferenciales significativos, la estructura puede no ser capaz de redistribuir las cargas con suficiente rapidez y efectividad, de manera que se pueden presentar fallas y fracturas. Desde luego, una de las ventajas del concreto reforzado es que si el movimiento ocurre durante un largo período de tiempo, el flujo bajo carga permitirá que alguna parte de la carga pueda ser redistribuida.

Sin embargo, esta es una de las causas principales de que aparezcan lesiones graves en una construcción (principalmente edificio) sea el hundimiento de los cimientos, es decir, que se den y arrastren consigo total o parcialmente la construcción a la que servían de base (véase foto IV.1).



Foto IV.1. Movimiento diferencial en un edificio donde se ve claramente las grietas.

A su vez, el hundimiento de los cimientos puede deberse a varias causas entre las que se encuentran:

- Insuficiente dimensionamiento de los cimientos, que no pueden soportar el peso de la construcción que gravita sobre ellos.
- Sobrecargas añadidas posteriormente a la construcción, sin tener en cuenta el valor soportante de las cimentaciones.
- Disgregación del cemento aglomerante que forma parte del cimiento o del concreto que lo constituye.
- Infiltraciones de agua en el plano del cimiento.
- Desplazamientos por empujes causados por otras cimentaciones de edificios que se levantan en sus inmediaciones.

En los dos últimos casos, el movimiento originado es el mismo; la modificación del terreno en que se apoya la cimentación origina nuevos asientos, los cuales provocan desplazamientos que producirán lesiones en los elementos estructurales, así como en los muros.

Estas situaciones pueden originar un desplazamiento de todo el edificio construido, o sólo de una parte del mismo. En este último caso, las tensiones producidas en ciertos puntos de la construcción, que sufrirán las consecuencias del fallo en los apoyos, pueden provocar la aparición de grietas, cuya importancia determinará el alcance de la lesión.

En la figura IV.2 se esquematiza el comportamiento de este tipo de lesiones. Según su extensión, el hundimiento puede ser:

- **Global.** Cuando se afecta la totalidad del edificio.
- **Terminal.** Si se presenta en uno o en ambos laterales de la fachada. Las grietas se abren a partir de la coronación hacia la base, y adoptan una configuración en diagonal, desde el exterior hacia el centro de la construcción.
- **Intermedio.** En el caso de que se provoque el hundimiento por la parte central. El agrietamiento nace en la zona de las cimentaciones y sube hacia la cubierta, aunque rara vez llega hasta ella. Se forman también en diagonal, aunque en dirección contraria que en las grietas terminales, es decir, van desde la parte central hacia la periferia, en línea ascendente.

Ya hemos dicho que una de las principales causas que provocan hundimientos totales o parciales de la construcción, es la insuficiencia de la superficie que ocupa la base de los cimientos. De poco servirá que en la confección de las cimentaciones se haya utilizado el mejor material, empleando la dosificación adecuada y llevando la obra con el mayor esmero, si por un error en los cálculos la base resulta insuficiente.

Las dimensiones de la base de cimentación, que están directamente en contacto con el terreno, dependen del peso que gravita sobre aquéllas y de la calidad del terreno.

En el caso del cedimiento de los muros soportantes la lesión se manifiesta ostensiblemente en los muros que gravitan sobre las cimentaciones que han sido afectadas por hundimientos más o menos pronunciados.

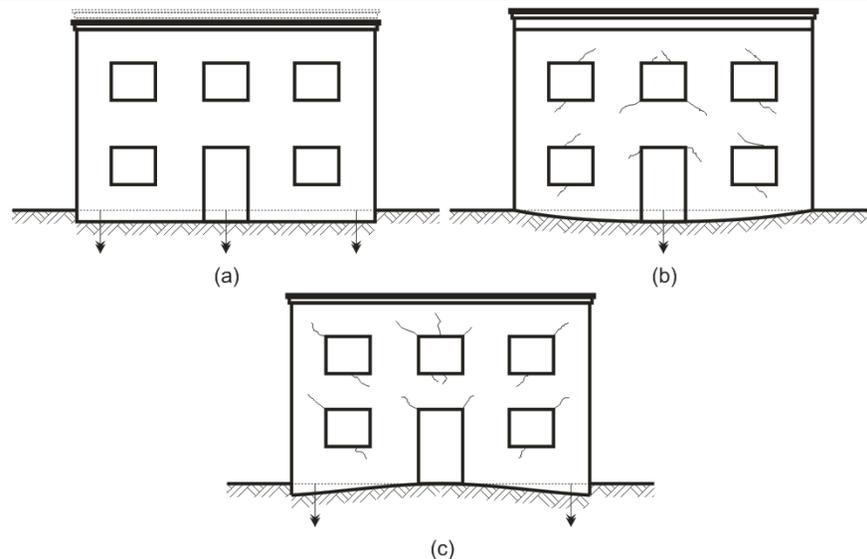


Figura IV.2. Esquemización de los hundimientos de la cimentación. a) global, que afecta a la totalidad de la construcción. b) intermedio. c) terminal.

Los casos más frecuentes son los cuatros que se citan a continuación:

- En los muros macizos levantados sobre cimentaciones continuas, las lesiones se manifiestan más acentuadamente en las plantas inferiores del edificio. La forma característica de la lesión es la de una parábola.
- Tratándose de muros que tienen huecos al exterior, construidos sobre cimentaciones continuas, las lesiones se presentan básicamente en forma de agrietamientos, en dirección por lo general oblicua, que nacen precisamente próximos a los ángulos de encuentro de jambas con los dinteles de las ventanas y puertas.
- En los muros macizos construidos sobre cimentaciones no continuas, las lesiones se caracterizan por iniciarse, espectacularmente en la coronación del edificio, terminando a cierta altura.
- En los muros con huecos al exterior construidos sobre cimentaciones no continuas, las lesiones aunque se originan siempre (salvo muy raras excepciones) a partir de los huecos, serán muchos más destacadas en la parte superior de la construcción.

#### IV.2.2. FALLAS POR MATERIALES

Los materiales también han experimentado cambios significativos y su selección debe estar basada en una calidad, una capacidad, unas experiencias y una formulación. Por ejemplo, hoy existe una gran variedad de cementos cuyas propiedades y características permiten diferentes usos y aplicaciones (por ello, es importante elegir el cemento apropiado por razones de durabilidad); el agua no sólo debe cumplir con los requisitos de calidad, sino que debe ser mesuradamente dosificada; los agregados deben tener granulometría continua y baja relación de vacíos, de lo contrario la mezcla tendrá alta tendencia a la segregación; el uso de aditivos debe ser racional y adecuado a las necesidades (sin excesos y sin exigir condiciones de riesgo para la estabilidad y la durabilidad del concreto); las adiciones, deben usarse cuando hay lugar a ellas y con conocimiento de causa.

Con relación al diseño de mezclas, es indispensable romper con la costumbre de utilizar «recetas únicas» dosificadas por volumen. La dosificación de los ingredientes debe hacerse por peso, con corrección de la humedad en los agregados, y con ajustes al agua de mezclado por adsorción o aporte del agua libre de los mismos agregados. Como fallas más usuales por materiales, se pueden distinguir las siguientes:

- Por selección inapropiada y/o falta de control de calidad de los ingredientes de la mezcla.
- Por no diseñar y/o dosificar inadecuadamente la mezcla.
- Por no respetar las tolerancias permisibles en el asentamiento de la mezcla.
- Por utilizar agregados de tamaño equivocado.
- Por utilizar exceso de aire incluido.
- Por adicionar agua a pie de obra, sin control.
- Por no disponer de un factor de seguridad apropiado en el diseño de la mezcla.
- Por no usar la curva agua/cemento de los materiales disponibles.
- Por utilizar poco cemento (mezclas pobres y porosas) o por emplear exceso de cemento (mezclas ricas con alta contracción y fisuración).
- Por usar mezclas pastosas (con exceso de mortero) o picaduras (con acceso de agregado grueso). Este tipo de mezclas tienen alta tendencia a la segregación y a la exudación.
- Por retardos excesivos en el fraguado. El retraso en el fraguado de un concreto, puede traer como consecuencia la formación de fisuras por asentamiento y/o contracción plástica, pero además, puede afectar la adherencia mecánica entre el acero de refuerzo y el mismo concreto.
- Por la presencia del fenómeno de falso fraguado, que tiende a inducir un incremento en el agua de mezclado con la consecuente alteración de la relación agua/cemento.
- Por fraguados acelerados que generan estructuras de pega pobres y por lo tanto bajas resistencias mecánicas.
- Por bajas resistencias en el concreto, lo cual conduce a fatigas prematuras o detrimento de la durabilidad.
- Por no llevar un control de calidad al concreto, con lo cual se desconoce su capacidad resistente y su comportamiento.
- Por acero de refuerzo de calidad inapropiada o por insuficiencia en los anclajes y/o longitudes de desarrollo. Sobre este aspecto se estipula que todo el acero principal longitudinal debe ser acero corrugado y que el acero liso sólo es permitido en estribos o espirales.



---

### IV.2.3. FALLAS POR CONSTRUCCIÓN

Una estructura fácil de construir, es una estructura que tiene mayores probabilidades de estar bien construida, y por lo tanto de ser más duradera. Además, hay que tener presente que cualquier estructura se comportará entre las solicitaciones que se le hagan, según como haya quedado construida y por ellos los procesos constructivos deben reflejar lo más fielmente posible (dentro de las tolerancias permisibles), los planos y las especificaciones dadas en las fases de planeación y diseño del proyecto.

Hoy en día existen muchos sistemas de construcción de estructuras de concreto reforzado y preesforzado, que en muchos casos demandan una metodología y unos cuidados específicos. Es decir, que debe haber una experiencia previa, unos cuidados y unas calificaciones de la mano de obra, un control de calidad y unas precauciones que permiten obtener la calidad especificada. Sin embargo, las fallas más comunes por los aspectos constructivos se dan por las siguientes causas:

- Por no calcular y diseñar la cimbra.
- Por defectos o deformaciones de la cimbra.
- Por no respetar las tolerancias dimensionales permisibles en los elementos. Por ejemplo, cambiar las dimensiones de los elementos, lo cual altera su geometría, su inercia y de paso su comportamiento, porque se altera su centro geométrico y su centro de masa.
- Por no inspeccionar la formaleta antes del vaciado, para verificar su integridad y estabilidad.
- Por no colocar apropiadamente ni asegurar el acero de refuerzo, permitiendo el desplazamiento durante el vaciado.
- Por no respetar la separación de barras de refuerzo y el recubrimiento, mediante el uso de separadores adecuados.
- Por no inspeccionar el acero de refuerzo antes del vaciado, para verificar el cumplimiento de los planos y especificaciones.
- Por utilizar malos procedimientos de izaje y montaje de elementos prefabricados, con lo cual se inducen deformaciones no previstas, impactos u otras condiciones que alterar sus propiedades.
- Por inadecuada interpretación de los planos.
- Por malas prácticas de manejo, colocación del acero.
- Por labores de descimbrado prematuro o inapropiado.
- Por indisposición de juntas apropiadas de contracción, dilatación y/o construcción.
- Por precargar la estructura antes de que el concreto tenga suficiente capacidad de resistencia.
- Por picar y abrir huecos en la estructura para soportar o conectar instalaciones anexas a la estructura.

#### IV.2.4. FALLAS POR OPERACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

El comportamiento real de una estructura y su seguridad bajo las cargas y condiciones previstas de servicio, se fundamenta en un buen diseño, el uso de los materiales indicados y la calidad de la construcción.

De acuerdo con el concepto de “vida útil de servicio” presentado en el primer capítulo, existe un período de tiempo para el cual la estructura se considera vigente hasta que completa un cierto y determinado nivel aceptable de deterioro, bajo las condiciones de uso.

Sin embargo, en la práctica la vida útil de servicio, puede acabar antes del tiempo previsto por «abuso» de la estructura (por ejemplo, incremento de las cargas permitidas o acción de fenómenos accidentales como impactos, explosiones, inundaciones, fuego u otras); o por «cambios de uso» (por ejemplo, cambio de las cargas de servicio y/o cambios de las condiciones de exposición).

Sin embargo, haya que reconocer que las condiciones de servicio y el envejecimiento y deterioro de los materiales como el concreto, en la realidad, son impredecibles.

#### IV.2.5. FALLAS POR FALTA DE MANTENIMIENTO

Finalmente, hay que reconocer que las condiciones de servicio y el envejecimiento y deterioro de los materiales como el concreto, en la realidad no son totalmente predecibles y por lo tanto, para mantener la confianza en la integridad estructural, el comportamiento, la funcionalidad, la estabilidad, la durabilidad y la seguridad, es necesario realizar unas inspecciones rutinarias que derivarán en la necesidad de un mantenimiento, reparación, rehabilitación y refuerzo de la estructura.

En la práctica, después de la puesta en servicio de una estructura, debería iniciarse el mantenimiento de la misma con una inspección preliminar y con base en ello y en las condiciones de operación del proyecto elaborar un “Manual de mantenimiento”. Este mantenimiento al igual que el que se practica en los vehículos puede ser preventivo, correctivo o curativo según el grado de deterioro o de defectos que exhiba la estructura.

El «**mantenimiento preventivo**» contempla los trabajos de reparación necesarios para impedir posibles deterioros o el desarrollo de defectos ya aparecidos. La limpieza de los sistemas de drenaje, es tal vez el ejemplo más simple de mantenimiento preventivo.

El «**mantenimiento correctivo**» hace referencia a la restitución de las condiciones originales del diseño, de manera tal que se restablezcan los materiales, la forma o la apariencia de la estructura. La restauración de estructuras es un buen ejemplo de mantenimiento correctivo.

El «**mantenimiento curativo**» tiene lugar cuando hay que reemplazar porciones o elementos de una estructura, por deterioro o defecto. La demolición y reparación de miembros estructurales, son técnicas empleadas para practicar el mantenimiento curativo.

### IV.3. ACCIONES MECÁNICAS

Son las acciones no previstas que aplican sobre una unidad un esfuerzo mecánico superior al que es capaz de soportar. Este tipo de causas son debidas a errores en los cálculos (sobrecargas), defectos en la ejecución, en el diseño o a un mal uso. Afectan sobre todo a los elementos estructurales, pero también pueden aparecer en cerramientos, tabiques o acabados. La transmisión de los esfuerzos mecánicos desde los elementos estructurales hasta los de cerramiento puede



agravar el problema, llegándose incluso a provocar desprendimientos. En cualquier caso las lesiones más comunes producidas por este tipo de causa son las deformaciones, grietas y fisuras.

Normalmente se suelen distinguir cuatro formas distintas de deformación mecánica:

- **Flechas.** Son el resultado de la flexión de elementos horizontales, (vigas y forjados) ante un exceso de cargas verticales o transmitidas desde otros elementos estructurales adyacentes.
- **Pandeos.** Se producen como consecuencia de un esfuerzo de compresión sobre un elemento vertical, tanto lineal como superficial, superior a su capacidad de carga.
- **Alabeos.** Son el resultado de una rotación del elemento constructivo provocada normalmente por esfuerzos horizontales.
- **Desplomes.** Son consecuencia de un desplazamiento de la cabeza de los elementos verticales provocada por empujes horizontales sobre la misma.

Es importante recalcar, que con mucha frecuencia, cualquiera de estos tipos de deformación se convierten, a su vez, en causa de otras lesiones mecánicas (fisuras, grietas o desprendimientos), sobre todo cuando afectan a elementos de obra de fábrica.

Por otro lado, todas estas formas de deformación se suelen clasificar en función de la causa que las ha originado, es decir, si se deben a alguna acción mecánica o si han sido provocadas por una deformación diferencial.

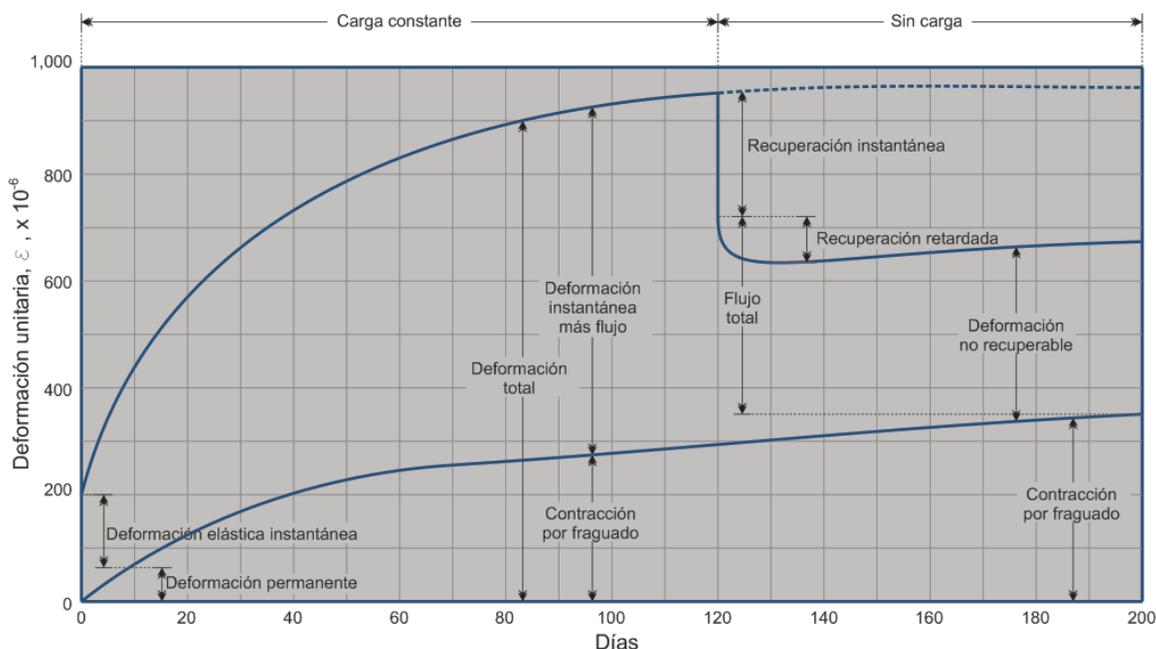
También se incluyen entre las causas directas de origen mecánico los impactos y rozamientos que se producen en los acabados, incluso el producido por el viento.

#### IV.3.1. EFECTO DE LAS CARGAS (FLUENCIA)

Cuando el concreto es cargado, la deformación causada por la carga se puede dividir en dos partes; una deformación que ocurre inmediatamente (deformación elástica) y una deformación dependiente del tiempo, que comienza inmediatamente pero que continúa a una tasa decreciente bajo carga sostenida. Esta última es considerada un aumento de la deformación unitaria elástica y es llamada fluencia o flujo bajo carga (creep). La naturaleza del proceso de fluencia se indica esquemáticamente en la figura IV.3.

En esta figura, se observa que la fluencia del concreto tiene un carácter diferente al flujo plástico que exhiben los metales, pues mientras en estos, los esfuerzos producen una deformación de la estructura cristalina, la cual puede volver a su configuración original por medio de la aplicación de calor; en la fluencia del concreto, se rompen enlaces entre las partículas de cemento hidratado entre éstas y las partículas del agregado. Esta circunstancia, hace que no sea posible recuperar toda la deformación lenta después de suprimir la carga aplicada a la estructura.

Lo anterior implica, que si retira una carga sostenida a un elemento de concreto, la deformación unitaria disminuye inmediatamente en una cantidad igual a la deformación unitaria elástica a la edad que tenga el concreto, que por lo general es menor que la deformación unitaria al aplicar la carga. Esta recuperación instantánea va seguida por una disminución gradual de la deformación unitaria llamada recuperación por fluencia. La reversibilidad de la fluencia no es total y por ello queda una deformación irreversible.



**Figura IV.3.** Curva característica de fluencia en un concreto, a través del tiempo.

La magnitud de la fluencia depende de la magnitud del esfuerzo, de la edad y resistencia del concreto cuando la carga es aplicada, y del tiempo durante el cual el concreto está cargado. Desde luego, también es afectada por otros factores relacionados con la calidad del concreto y las condiciones de exposición, tales como: el tipo, cantidad y tamaño máximo del agregado; tipo de cemento y calidad de la pasta; tamaño y forma del elemento estructural; cantidad de acero de refuerzo; y condiciones de curado.

Dentro de rangos de resistencia normales, las deformaciones por fluencia para un concreto determinado son prácticamente proporcionales a la magnitud del esfuerzo aplicado; a un esfuerzo dado, los concretos de alta resistencia muestran menos fluencia que los concretos de resistencia inferior.

### IV.3.2. SOBRECARGAS Y DEFORMACIONES IMPUESTAS

Con relación a las sobrecargas y deformaciones impuestas, es claro que si rebasa la capacidad resistente del material (por precargas o sobrecargas); o hay deflexiones o movimientos excesivos o imprevistos (asentamiento del terreno; y deformaciones y colapsos impuestos por eventos fortuitos como el viento, los sismos, las explosiones u otros eventos); o se presentan fracturas y aplastamientos (grietas de apoyo, fracturas de aplastamiento local, fracturas por impacto y desintegración por trituración), las consecuencias se manifiestan mediante deficiencias estructurales (microfisuras, fisuras y/o el colapso de la estructura), según la intensidad de los mecanismos de acción.

### IV.3.3. GRIETAS ESTRUCTURALES (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)

Las grietas estructurales son consecuencia de esfuerzos que actúan en la sección neta resistente de los elementos estructurales, por aplicación de cargas directas. En realidad, en cualquier elemento de concreto reforzado es probable que se presenten una fisuración relativamente pequeña (con ancho de grietas menor a 0.5 mm), bajo las cargas de servicio normales, siempre y cuando las armaduras no alcancen su límite elástico. Usualmente, esta fisuración se presenta en los puntos en que las tensiones son máximas.

Cuando el ancho de las fisuras producidas por la aplicación de cargas directas es grande (grietas mayor a 0.5 mm), ello indica casi siempre que la condición de los estados límites últimos ha sido incorrecta por alguna de las causas que se enumeran a continuación y entonces el plano de falla generado adquiere la denominación de grieta:

- Por errores de cálculo.
- Por haberse infravalorado o despreciado los efectos de una determina hipótesis de carga.
- Por no haber dimensionado adecuadamente la sección del elemento estructural.
- Por no haber dispuesto suficiente armadura para resistir ciertas solicitaciones.
- Por escasez de armado hasta el punto de que bajo las cargas de servicio, el acero haya alcanzado su límite elástico.
- Por inadecuada especificación de los materiales (baja resistencia estructural del concreto y del acero).

Sin embargo, la fisuración y el agrietamiento también pueden deberse al hecho de que el concreto esté sometido localmente a tensiones excesivas. Por ejemplo, el agrietamiento causado por tensiones de adherencia demasiado elevadas (que siguen longitudinalmente la directriz de las armaduras); el agrietamiento causado por cargas puntuales o concentradas (zona de anclaje de torones de preesfuerzo); los cambios bruscos de sección de elementos estructurales (uniones de losas esbeltas con vigas relativamente masivas); elementos con presencia de aristas vivas o esquinas agudas (elemento de alta relación área/volumen y geometría inapropiada); elementos que causan restricción al libre movimiento (falta de juntas de dilatación); u otros.

Entre los planos de falla clasificados como estructurales, que originan como una ruptura frágil (aquella que carece de armadura), o como una ruptura dúctil (con la presencia de acero de refuerzo) y que son inducidas por precargas, cargas de servicio o sobrecargas, se encuentra las que se indican en la figura IV.4.



Figura IV.4. Tipos de fisuras y grietas estructurales.

La fisuración y el agrietamiento causados por esfuerzos de tensión o flexión derivada de posibles deficiencias estructurales, suelen ser perpendicular a la dirección del refuerzo longitudinal, dispuesto en la dirección de la tensión principal. La existencia de armadura transversal (estribos), puede hacer que las fisuras se alineen con ellas e incluso favorezcan el inicio y la propagación de las mismas fisuras, si el recubrimiento de las varillas de acero ante este esfuerzo no es suficiente.

Desde luego, las fisuras de adherencia, se forman a lo largo de la dirección de las barras del refuerzo principal.

Por otra parte, los esfuerzos de corte y tensión provocan fisuras oblicuas que también son transversales a la dirección del acero longitudinal principal. Las fisuras de torsión también son oblicuas pero continuas y en espiral. El punzonamiento, es propio de las losas con deformaciones impuestas locales y ocasiona fallas con geometría trocopiramidal cuya directriz es el área cargada. La compresión simple es paralela a la dirección de la carga.

#### IV.3.3.1. Grietas por tracción pura

Como ya se ha mencionado, el concreto simple ofrece una resistencia muy baja a los esfuerzos de tensión (su resistencia a la tensión es apenas del orden de un 10% de la resistencia a la compresión). Por ello, es obvio considerar la tensión pura como el caso más básico de agrietamiento.

Si se considera una viga de sección prismática como el de la figura IV.5 y se somete a un esfuerzo de tensión que rebasa su capacidad resistente, se forman planos de falla (fisuras y grietas) transversales a lo largo de su sección. Según el ACI 224, para estos casos, la variable que tiene mayor incidencia sobre el agrietamiento del concreto reforzado es el incremento de los esfuerzos de tensión actuantes sobre el acero; lo cual provoca, de manera súbita una grieta que afecta la unión entre el concreto y la barra de acero en una determinada zona (distancia de deslizamiento), alrededor de la sección agrietada. Como consecuencia de ello, entonces se interrumpe la transferencia de los esfuerzos actuantes por pérdida de la adherencia mecánica entre el acero y el concreto.



Figura IV.5. Grietas de tracción pura, con interrupción de la adherencia mecánica entre el acero y el concreto.

Adicionalmente, en estos casos, el ancho de la grieta es mínimo cerca de la barra de acero (pero hay fisuras y microfisuras por el efecto de la conexión) y se incrementa a medida que se aleja de ellas. Ello genera patrones de espaciamiento entre grietas, como se muestra en la figura IV.5.

#### IV.3.3.2. Grietas por flexión

Para una viga, una losa o un muro (véase figura IV.6), sometidos a esfuerzos de flexión que causan una deformación por pandeo del elemento, se presentan tensiones en la cara sometida a la expansión de su superficie, que originan fisuras y grietas. Estos planos de falla son de dos tipos: grietas por flexión, que originalmente son fisuras por tensión, las cuales se extienden hasta llegar al eje neutro de la sección; y grietas por tensión, que emergen como una manifestación del aumento de la deformación, se localizan entre las fisuras de flexión y se extienden por encima de las barras de refuerzo.

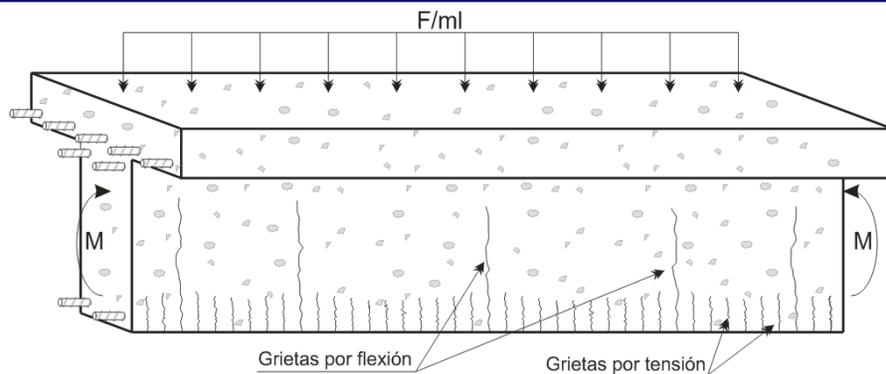


Figura IV.6. Grietas por flexión y tensión en un elemento sometido a esfuerzos de flexión.

Como las grietas por flexión se extienden hasta el eje neutro, es decir, hasta donde empieza la zona de compresión, queda revelada así la posición real de este en el elemento; y ello, permite verificar si el esfuerzo es el adecuado o no. También, el ancho de las grietas indica el nivel de esfuerzos de tensión al que han sido sometidas las barras de refuerzo. Anchos pronunciados indican altos esfuerzos por: exceso de carga (posibles precargas o sobrecargas); por insuficiencia de refuerzo longitudinal principal; y/o por insuficiencia de refuerzo longitudinal entre las barras principales y el área de compresión, es decir, el alma del elemento.

#### IV.3.3.3. Grietas longitudinales

Las grietas longitudinales son aquellas que se forman a lo largo de la dirección de las barras de refuerzo, las cuales tienen su origen debido a la falta de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo. Esta situación, no es usual en estructuras bien calculadas y construidas, bajo las cargas normales de servicio. Pero sí se presentan, indican un grave deterioro del comportamiento mecánico del elemento y de exposición extrema del acero principal a eventuales sustancias agresivas. Ocasionalmente, la falta de adherencia se presenta porque durante la construcción, las varillas de acero se impregnan de aceites, bentonita o tienen óxido disuelto.

Así mismo estas grietas se pueden formar como resultado de los esfuerzos de tracción que producen deformación de las barras del refuerzo principal, provocando a su vez un «sobreesfuerzo local» de compresión entre el concreto y los resaltados de corrugado de las barras de acero (se debe recordar que todo el acero longitudinal debe estar conformado por barras de acero corrugado y que el acero liso sólo es permitido en estribos y espirales).

Estos sobreesfuerzos locales de compresión en el concreto, alrededor de las barras de acero, tienden a dividir por fracturamiento la sección transversal del elemento (véase figura IV.7). Los esfuerzos de tensión que producen deformación en las barras de refuerzo principal, pueden darse como consecuencia de tensiones excesivas o donde hay fallas de anclaje o traslape de una o varias varillas de refuerzo (por ejemplo, en secciones transversales donde la cantidad de barras cambia, o donde no se da suficiente longitud de desarrollo al traslape entre varillas).

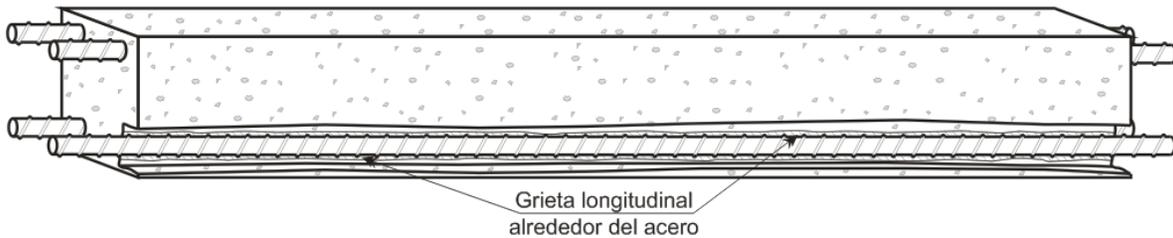


Figura IV.7. Grietas longitudinales por falta de adherencia.

#### IV.3.3.4. Grietas por cortante

Para el caso de vigas y losas sometidas a esfuerzos de corte, la deformación que ocurre puede causar las llamadas «grietas de cortante» que aparecen inclinadas en las zonas cercanas a los apoyos (véase figura IV.8). El ángulo entre las grietas de cortante inclinadas y el eje de la viga es de aproximadamente de  $45^\circ$  (zona de máximo cortante y mínimo momento de flexión, por cargas verticales). Algunas veces, si existen fisuras de tensión en la parte superior de la viga (que se han causado por momentos negativos de flexión cerca del apoyo), éstas tienden a unirse con las grietas por cortante.

Sin embargo, las grietas de cortante no solamente pueden aparecer en las zonas cercanas a los apoyos; también pueden presentarse en el centro de un elemento, sobre todo si hay cargas puntuales y/o pocos estribos, en cuyo caso la grieta que se presenta obedece a un esfuerzo combinado de cortante y flexión. Este tipo de agrietamiento, se considera serio desde el punto de vista mecánico.

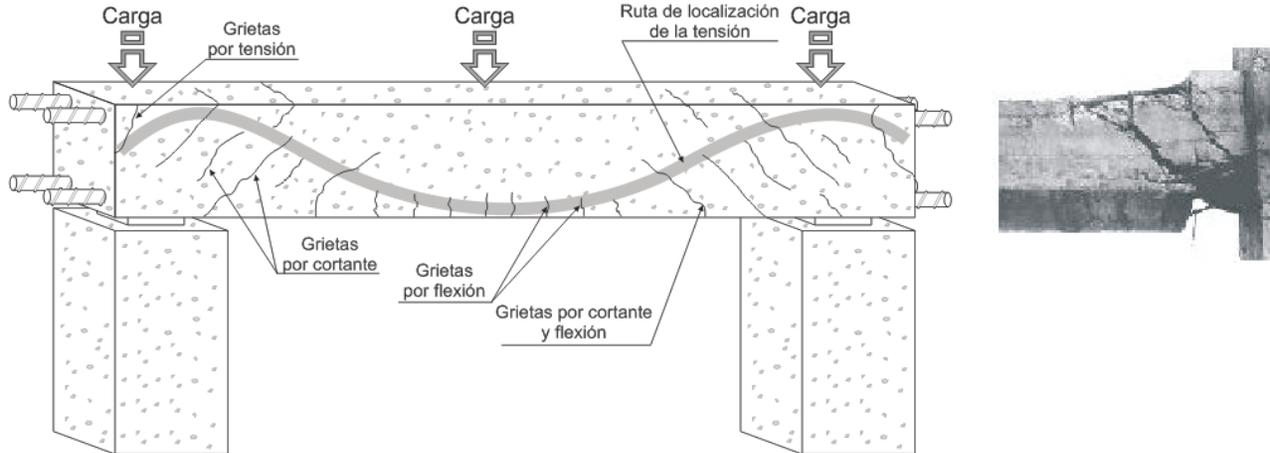


Figura IV.8. Grietas por cortante, flexión, tensión en vigas de concreto reforzado.

Al observar la figura IV.9, para una viga simplemente apoyada, se puede apreciar que en la zona comprendida entre apoyos, las grietas por flexión serán más o menos inclinadas, dependiendo de la magnitud del esfuerzo cortante y de la relación que exista entre los esfuerzos cortantes y de flexión.

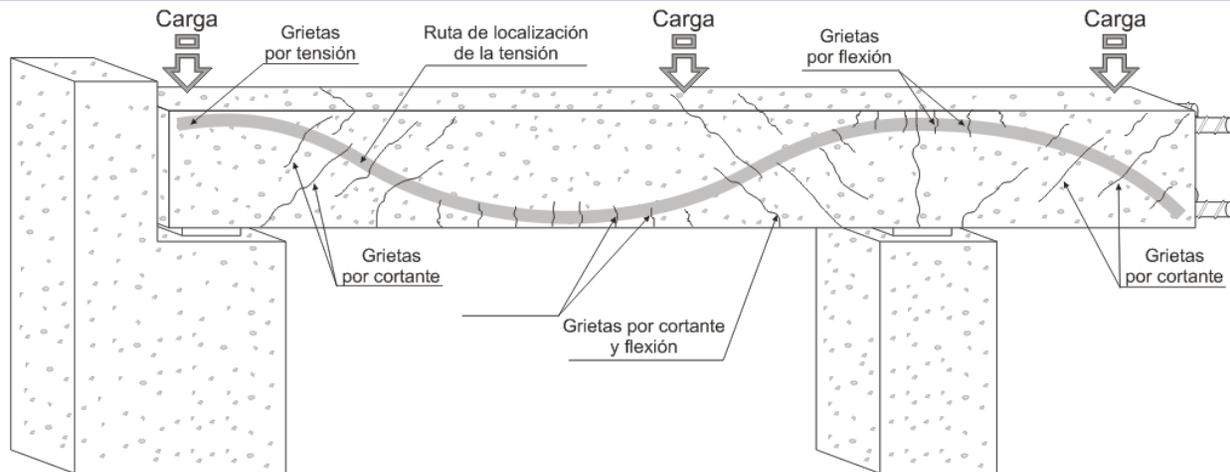


Figura IV.9. Grietas por cortante, flexión y tracción a lo largo de un viga simplemente apoyada con restricción lateral en un apoyo.

Las grietas por cortante, siempre atraviesan todo el espesor de la viga y su ancho depende de la sección de la viga (ancho grande en secciones altas y esbeltas) y/o a la magnitud de los esfuerzos por cortante (más ancha si el esfuerzo es grande).

#### IV.3.3.5. Grietas por torsión

Los esfuerzos de torsión en un elemento estructural como una viga, causan grietas transversales e inclinadas similares a las grietas por cortante, pero difieren en estas últimas en que siguen un patrón de espiral que atraviesa toda la sección de los miembros afectados, con un ángulo de inclinación de 45° aproximadamente (véase figura IV.10).

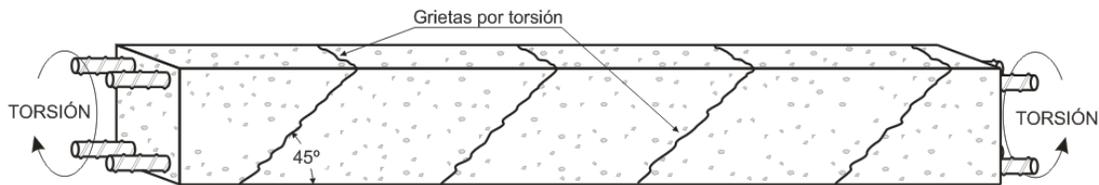


Figura IV.10. Patrón de grietas por torsión en una viga prismática.

#### IV.3.3.6. Grietas por punzonamiento

La condición de estado límite por punzonamiento se alcanza en elementos que experimentan tensión, originados por tensiones tangenciales, que a su vez son motivadas por una carga o reacción localizada en un área relativamente pequeña. Este fenómeno de falla, se caracteriza por la formación de una superficie de fractura en forma de tronco de pirámide, cuya directriz es el área cargada. Usualmente, la falla es del tipo frágil, lo cual denota falta de refuerzo en la zona.

Un ejemplo típico, se puede apreciar en la figura IV.11, donde se muestra una losa de concreto reforzado que descansa sobre una columna. En esta figura, se puede observar, que el ángulo de la fractura es de aproximadamente 33°.

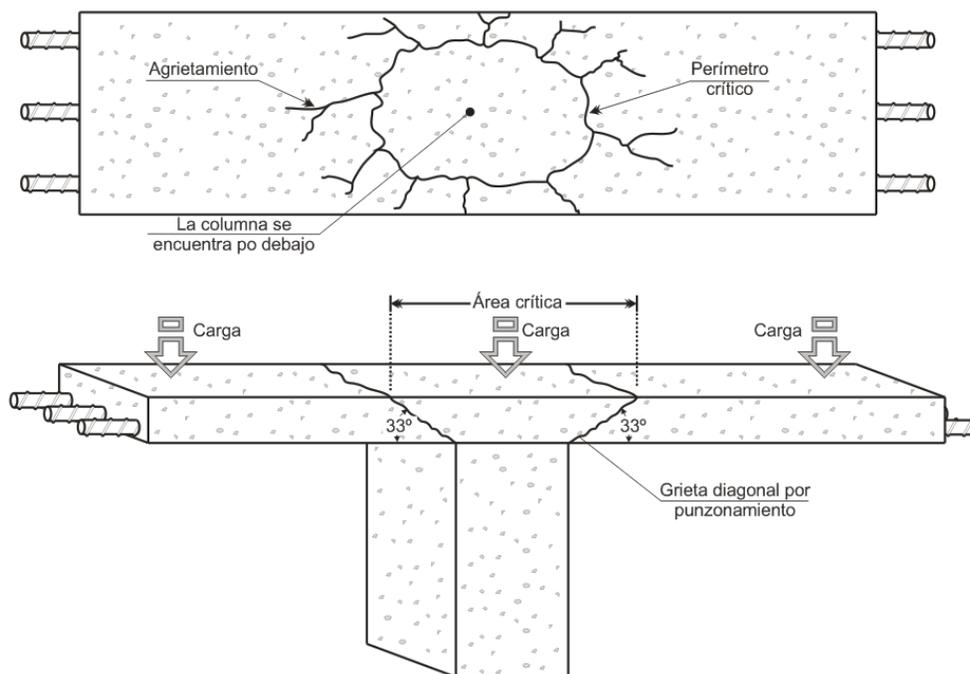


Figura IV.11. Patrón de falla local por aplastamiento.

#### IV.3.3.7. Grietas por compresión simple

Cuando un elemento de concreto como una columna está sometido a una carga axial, se produce un esfuerzo de compresión simple que actúa sobre toda la sección transversal de la columna. Si se rebasa la capacidad resistente de la columna a la compresión, las fisuras por aplastamiento se manifiestan con rotura inclinada con aproximación a los  $60^\circ$  por cortante y, suele ocurrir en columnas de concreto reforzado muy secos con resistencias muy altas como se observa en la figura IV.12.

Una de las características de la compresión simple por aplastamiento que presenta un fisuramiento inclinado, es que las barras de refuerzo intentan pandearse y salirse del concreto, tal y como se puede apreciar en la figura IV.13.

Otra de los síntomas que produce la compresión simple sobre un elemento es que aparecen fisuras en las esquinas por pandeo de las barras, entonces ocurre una fisuración con directriz paralela a la carga. También pueden surgir fisuras en el centro del soporte, dividiéndolo, como se puede apreciar en la figura IV.13. El recubrimiento de la armadura es lo primero que se pierde.

También suelen aparecer fisuras verticales que cortan el pilar, incluso soportando éste poca carga, cuando el concreto reforzado no ha alcanzado su resistencia y ha entrado en carga prematuramente, o bien porque ha sido descimbrado antes de lo previsto. Esto se puede comprobar fácilmente, observando las huellas que sobre él dejan los operarios.

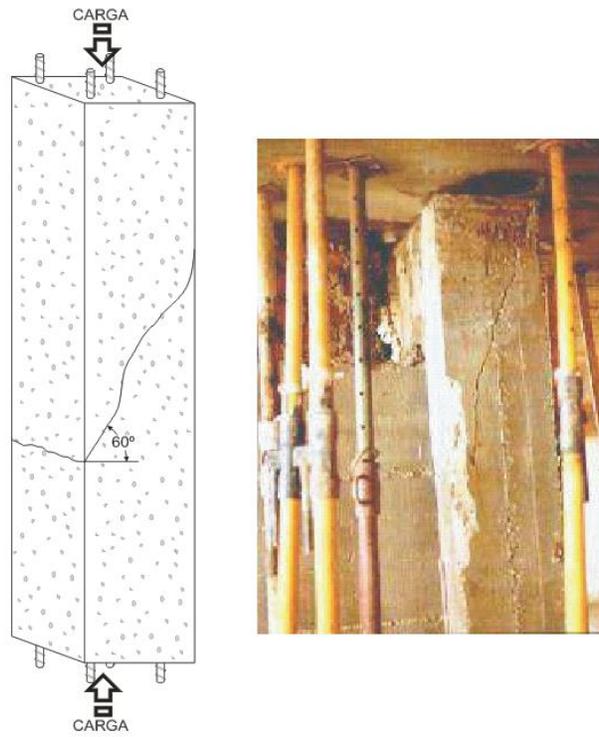


Figura IV.12. Fisura inclinada en columnas por compresión simple.

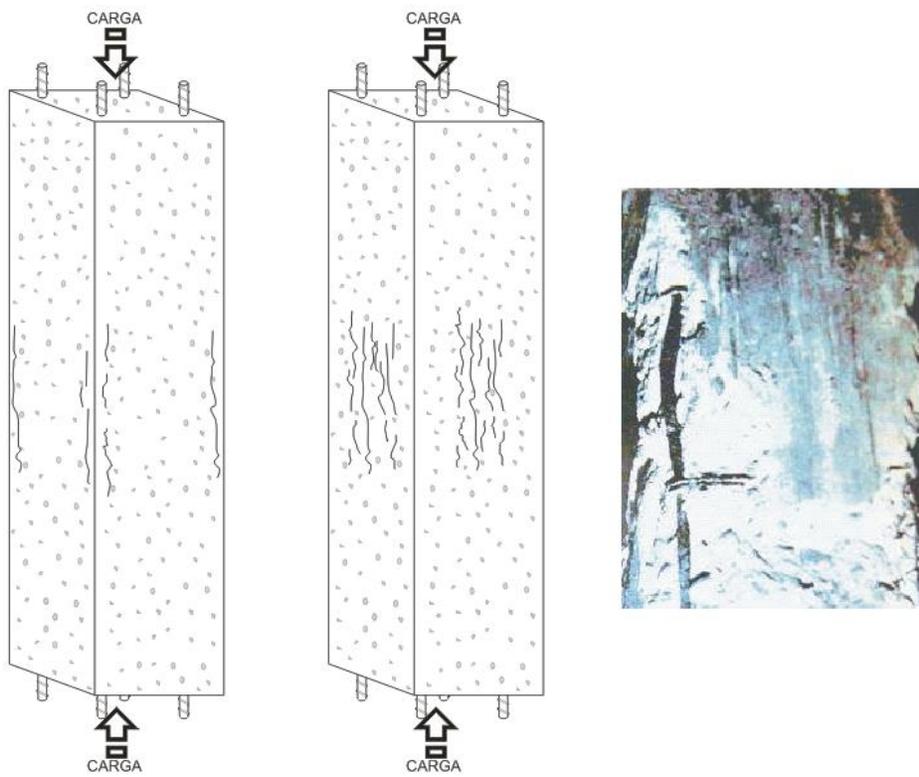


Figura IV.13. Patrón de falla de compresión simple en columnas.

Una de las recomendaciones al momento de fabricar este tipo de elementos es que no deben cerrarse todos los estribos en una misma barra principal, pues si son incorrectos es más fácil que puedan abrirse y romper una esquina del pilar, como se indica en la figura IV.14, dando la impresión de que se trata de una fisura por pandeo de las barras debido a un exceso de carga, o de una corrosión de la armadura.

Ahora bien, si en la columna se utilizó concreto de mala calidad o de una resistencia baja a la especificada, la ruptura comenzará en la parte superior. Se presentarán fisuras en la parte superior que irán descendiendo hacia la parte media de la columna, como se muestra en la figura IV.15. Este tipo de falla se debe a que el concreto de la cabeza de la columna es algo más débil por las segregaciones que se producen durante el colado y por un mal vibrado.

Sin embargo, en elementos constructivos como columnas, también suelen aparecer fisuras y grietas por pandeo. Estas fisuras y grietas son horizontales, es decir perpendiculares a las barras principales de refuerzo y se localizan por lo general en la parte media del elemento, y por lo general el concreto de recubrimiento se desprende de ésta parte, como se muestra en la figura IV.16.

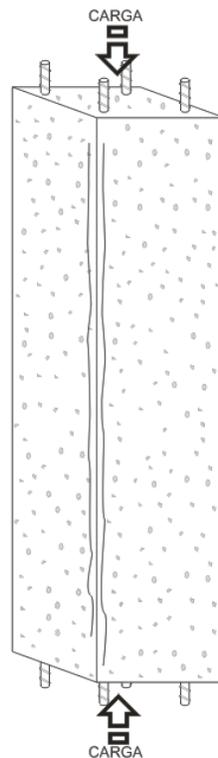


Figura IV.14. Fisuras por cerramiento de estribos en la misma barra de acero principal.

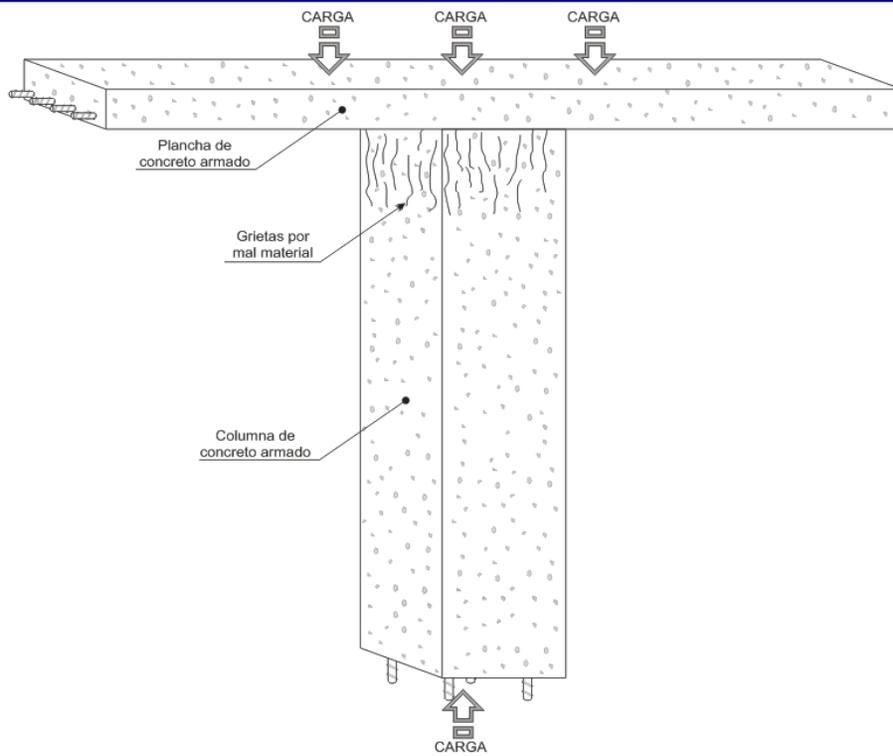


Figura IV.15. Fisuras sobre columna por concreto de la mala calidad.

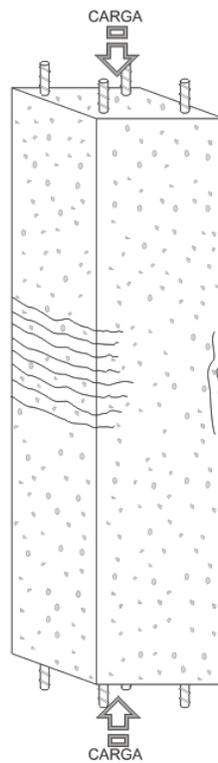


Figura IV.16. Grietas por pandeo en columna.

### IV.3.4. FRACTURAS Y APLASTAMIENTOS

Dentro de los fenómenos que originan fracturas y aplastamientos en el concreto, se encuentran las grietas de apoyo; los planos de falla por aplastamiento local; las fracturas y los descascaramientos por impactos; y la desintegración por trituración.

#### IV.3.4.1. Grietas de apoyo

Cuando se tienen elementos simplemente apoyados, como por ejemplo vigas, se pueden generar fracturas y fallas de borde que están en conexión con las zonas de apoyo. Entre ellas, pueden darse varias modalidades, las más usuales son las siguientes:

- *Fracturas por rigidez del apoyo.* Ocurre cuando la conexión (junta de dilatación) entre el elemento que se apoya y el elemento de apoyo no tiene una transición adecuada mediante un elemento de amortiguamiento como un «cojín de neopreno». Usualmente la fractura ocurre como consecuencia de los movimientos y esfuerzos horizontales que experimenta la zona de apoyo, por los ciclos de dilatación y contracción térmica; y/o por la rotación que experimenta el elemento apoyado, lo cual puede inducir a sobreesfuerzos locales de compresión al concreto de la esquina del elemento de apoyo (véase figura IV.17).

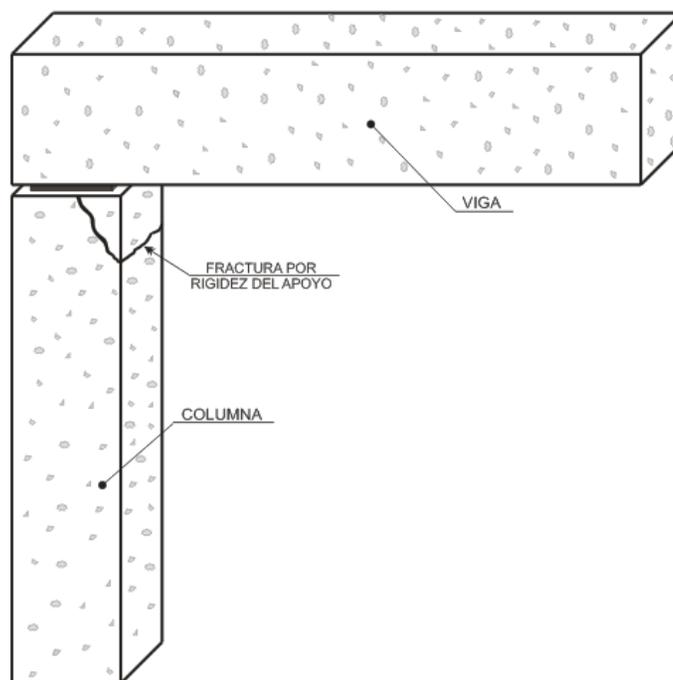


Figura IV.17. Patrón de fractura de borde, por rigidez del apoyo.

- *Fractura inducida por el recubrimiento.* Ocurre en ciertas ocasiones, cuando el material de transición y amortiguamiento se sitúa muy cerca del borde de los elementos y por ello se induce un plano de falla que descargara el recubrimiento de las barras principales del refuerzo que se encuentran dobladas (véase figura IV.18).

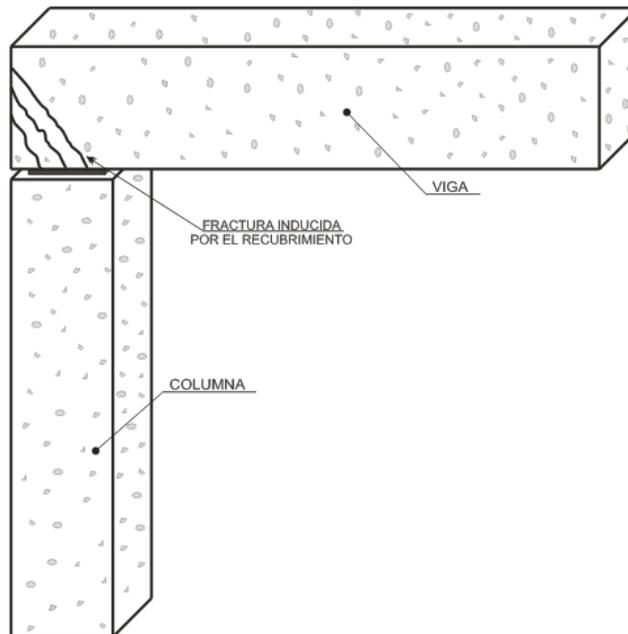


Figura IV.18. Patrón de fractura inducida por el recubrimiento.

- *Fractura por falla del refuerzo en el borde.* Este tipo de fisura ocurre cuando en el borde del extremo de una viga que se apoya sufre esfuerzos de compresión y/o tensión locales, y se ha reforzado insuficientemente o el refuerzo principal está compuesto por varillas de gran diámetro que al ser dobladas requiere de un amplio rango de doblado que no se cumple (ver figura IV.19).

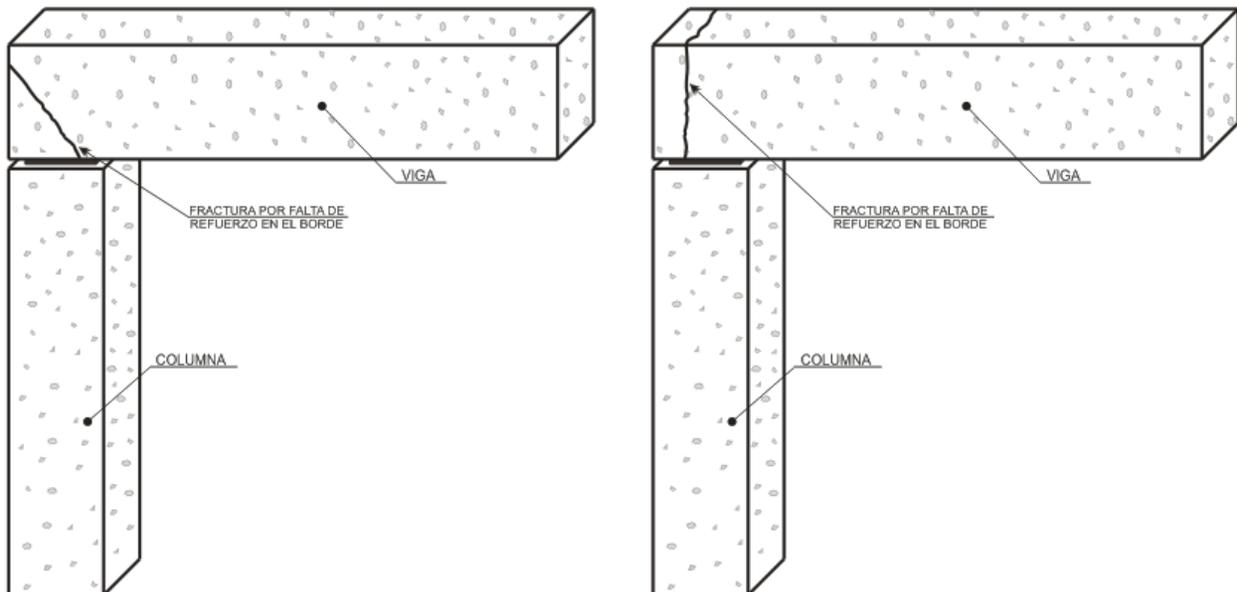


Figura IV.19. Patrón de fractura por refuerzo inadecuado en el borde.

#### IV.3.4.2. Fracturas por aplastamiento local

Las fracturas y grietas por aplastamiento tienen su origen en la alta concentración de cargas que a veces se dan en las zonas de apoyo de elementos simplemente apoyados, o en las zonas de anclaje para el pre-esfuerzo y de torones y cables. Cuando el aplastamiento ocurre por una carga concentrada, el patrón de falla se localiza directamente debajo de ésta, que tiende a dividir la sección de concreto localmente (véase figura IV.20).

#### IV.3.4.3. Fracturas por impacto

En cuanto a los impactos y las vibraciones, ambos pueden iniciar o propagar grietas. Es raro encontrar cargas de impacto en las estructuras, pero cuando exista la posibilidad de su presencia, es recomendable utilizar un criterio de diseño conservador para que el agrietamiento sea el mínimo posible. Por ejemplos para maquinaria pesada en contacto con una estructura, suele utilizarse un factor de impacto del orden del 25% del peso de la maquinaria.

#### IV.3.4.4. Desintegración por trituración

La desintegración por trituración, se da como consecuencia de la fatiga del material ante diferentes sollicitaciones mecánicas, pero principalmente por el efecto de cargas concentradas que desintegran el concreto donde este experimenta sobre esfuerzos de compresión.

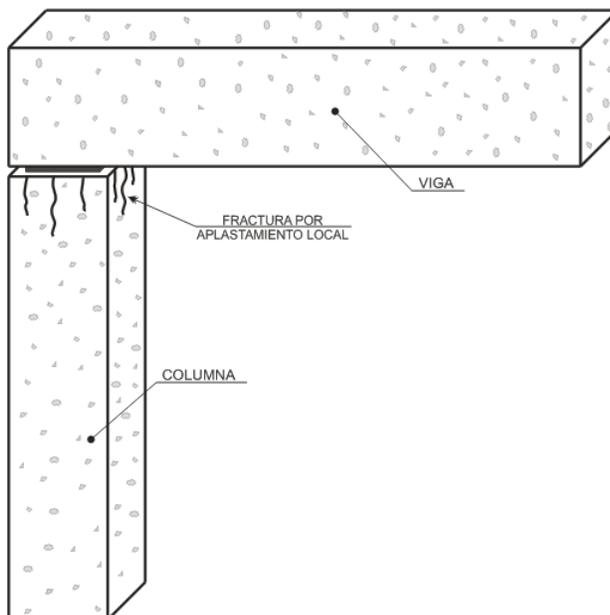


Figura IV.20. Patrón de falla local por aplastamiento debido a una carga concentrada en una columna.

#### IV.3.5. VIBRACIONES EXCESIVAS

El efecto de la vibración es especialmente acumulativo y las grietas preexistentes o nuevas continúan desarrollándose a medida que pasa el tiempo. Por lo tanto, es importante hacer un diseño por cargas dinámicas y la clave de un diseño dinámico satisfactorio consiste en asegurar que la frecuencia natural de la estructura de apoyo de la fuente vibrante (maquinaria u otros), sea significativamente diferente de la frecuencia de la fuerza perturbadora.



Si ambas frecuencias son aproximadas, la vibración resonante se establecerá en el apoyo de la estructura. Para minimizar las vibraciones resonantes, la relación entre la frecuencia natural de la estructura y la frecuencia de la fuerza trastornante debe mantenerse fuera del rango de 0.5 a 1.5.

#### **IV.3.6. DAÑOS POR ABRASIÓN**

La resistencia del concreto a la abrasión se define como la habilidad de la superficie para resistir el desgaste producido por frotamiento, fricción, erosión de materiales abrasivo o erosión por cavitación. Este fenómeno es difícil de valorar, ya que la acción perjudicial varía según la causa de daño. Por ello, la resistencia a la abrasión se relaciona siempre con su resistencia a la compresión. En términos generales se consideran cuatro tipos de abrasión:

##### **IV.3.6.1. Desgaste por frotamiento**

Es el desgaste de pisos de concreto debido al tráfico de peatones y vehículos ligeros, patinazos, raspaduras y deslizamientos de objetos sobre la superficie.

##### **IV.3.6.2. Desgaste por fricción**

Es el desgaste de la superficie de pavimentos urbanos y carreteras de concreto, debido a la acción de camiones pesados y automóviles que generan fricción por rodamiento, raspaduras y en algunas ocasiones percusión (por ejemplo, llantas que tienen tachones o cadenas).

##### **IV.3.6.3. Erosión por materiales abrasivos**

La erosión es típica de estructuras hidráulicas tales como presas, túneles y estribos de puentes u otras estructuras, que están sujetos a la acción de materiales abrasivos llevados por el agua corriente o por el viento.

En este caso, la magnitud de la erosión depende de la cantidad, forma, tamaño y dureza de las partículas sólidas transportadas, así como de la velocidad de su movimiento y la aparición de remolinos. Por lo general, el concreto con agregados grandes se desgasta menos que un concreto de la misma resistencia y desde luego, los agregados duros mejoran la resistencia a la abrasión por erosión.

##### **IV.3.6.4. Erosión por cavitación**

La erosión por cavitación genera huecos y cavidades en el concreto debido a las formaciones de burbujas de vapor cuando la velocidad del agua es muy alta y está acompañada de presiones negativas. Este fenómeno es típico en presas de concreto, vertedores, túneles y otros sistemas de conducción de agua. En términos generales, la resistencia a la erosión por cavitación, la proporciona la pasta de cemento.

El fenómeno consiste en que cuando el agua sin sólidos en suspensión fluye rápidamente sobre una superficie de concreto, cualquier cambio en la geometría de la superficie ocasiona que el flujo de agua se separe de la misma superficie, creando zonas de baja presión. Si la presión estática de la corriente del agua es menor que la presión de vapor, se forman burbujas de vapor de agua; y al fluir estas burbujas hacia zonas donde la presión estática supera a la presión de vapor de agua, el vapor de las burbujas se condensa y éstas estallan bruscamente. Como consecuencia de la onda expansiva y de la presión, ocurren picaduras y cavidades superficiales en el concreto.

## IV.4. ACCIONES FÍSICAS

Las acciones físicas son los agentes atmosféricos que indican sobre las construcciones. La lluvia provoca humedades, ensuciamientos por lavado diferencial, etc. El cambio de temperatura provoca dilataciones y contracciones que suelen convertirse en fisuras y grietas; las heladas provocan desprendimientos y erosiones; el viento influye en la acción de la lluvia, y la contaminación atmosférica produce el ensuciamiento de los paramentos por lavado diferencial o por depósito. Pero, como ya se mencionó, las acciones físicas también hacen referencia a las variaciones que el concreto puede tener en su masa y que afectan el peso unitario, la porosidad y la permeabilidad (por ejemplo, reacciones álcali-agregado, por contracción, por carbonatación, por expansión, por ataque de sulfatos o por hinchazón del acero de refuerzo por corrosión).

### IV.4.1. PLANOS DE FALLA Y FISURAS EN EL CONCRETO

Aunque el concreto es muy resistente a la compresión, su capacidad de tolerar esfuerzos de tensión es relativamente débil y por ello, los movimientos que en él se experimentan y que se manifiestan mediante deformaciones (intrínsecas o extrínsecas), puede desarrollar microfisuras, fisuras y grietas.



Figura IV.21. Tipos de deformaciones en el concreto.

Grandes esfuerzos y rupturas pueden ser prevenidos o minimizados mediante el control de las variables que afectan los cambios de volumen. La comprensión de la naturaleza de estos cambios, es útil para el análisis y prevención de planos de falla y agrietamiento.

### IV.4.2. CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO PLÁSTICO

Durante el estado plástico, los cambios volumétricos del concreto pueden ser consecuencia de la contracción o dilatación que experimenta el material, los movimientos que se pueden dar durante la etapa de vaciado o de fraguado, o las heladas tempranas. Todos estos son fenómenos que ocasionan fisuras, las cuales se presentan sólo en la pasta de cemento, es decir, que no atraviesan el agregado sin que lo rodeen.

#### IV.4.2.1. Fisuras plásticas

Las microfisuras y fisuras plásticas se caracterizan por fenómenos como el asentamiento plástico y la contracción plástica. Estos dos fenómenos a su vez, están íntimamente ligados a la cantidad de agua de mezclado y a la exudación del concreto.

Los **asentamiento plástico** se caracterizan en el concreto fresco cuando éste ha sido colocado y compactado en la obra, los sólidos de la mezcla tienden a asentarse (hundirse dentro de la masa) por efecto de la gravedad, desplazando los elementos menos densos como el agua y el aire atrapado; el agua aparece en la superficie como agua de exudación y el asentamiento continúa hasta que el concreto se endurece.



Cuando hay obstáculos tales como partículas de agregado grandes, acero de refuerzo o elementos embebidos dentro del concreto, estos pueden obstruir el libre acomodamiento de la mezcla, provocando asentamientos diferenciales y la formación de grietas en el concreto plástico.

Por otra parte, en algunas ocasiones la presión que ejerce el concreto fresco sobre la cimbra o el suelo, hace que estos se deformen y causen asentamientos plásticos adicionales con la consecuente aparición de fisuras. Igualmente puede ocurrir cuando se vacía concreto sobre un ligero declive, en cuyo caso la mezcla tiende a escurrirse.

Desde luego, una mezcla de consistencia húmeda se asentará durante más tiempo y en mayor grado que otra de consistencia seca, ya que la primera contiene más agua por volumen unitario de concreto, generando desde luego la presencia de mayor cantidad de agua de exudación.

En general, en asentamiento plástico induce fisuras amplias (hasta de 1 mm) y poco profundas; es decir, de escasa transcendencia estructural. Sin embargo, de presentarse deben ser obturadas de inmediato para evitar problemas de durabilidad por penetración de sustancias indeseables.

Para las de asentamiento obstruido, usualmente, se apreciarían patrones longitudinales que siguen la dirección de las barras de refuerzo de la cara superior en vigas y losas; o señalando la localización de los estribos en las caras laterales de columnas y pilas.

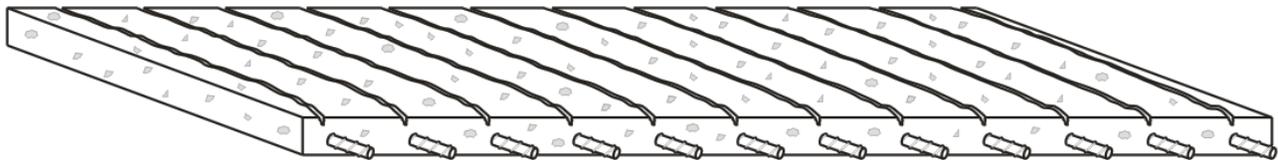


Figura IV.22. Fisuras por asentamiento plástico, causadas por bajo recubrimiento y/o alta fluidez.

Los cambios volumétricos que generalmente se presentan en superficies horizontales mientras el concreto esta aún fresco, recibe el nombre de **contracción** o **retracción plástica** y por lo común genera microfisuras y fisuras que brevemente después de que el brillo del agua desaparece de la superficie del concreto y una vez que comienzan se extienden rápidamente.

Este tipo de fisuras es más probable que ocurra en clima cálido y seco, que en clima frío y húmedo, pues la principal razón de su presencia, es la evaporación extremadamente rápida de la humedad superficial del concreto.

La fisura por contracción plástica, generalmente ocurre entre las dos y las cuatro primeras horas después del mezclado. Generalmente, son fisuras de poco espesor (0.2 mm a 0.4 mm) y profundidad (menos de 30 mm) iniciales. Sin embargo, a medida que aumenta el diferencial de humedad en la capa superficial del concreto, con relación a su masa interna, pueden incrementar su profundidad de manera considerable. Incluso en losas de entrepiso, pueden pasar de lado a lado.

Su longitud puede variar desde unos cuantos centímetros hasta aproximadamente un metro. Por lo común, son fisuras en forma de línea recta que no siguen un mismo patrón y no presentan ninguna simetría; aunque, ocasionalmente se han observado siguiendo la forma de una pata de gallo.

Tales fisuras ocurren cuando el agua se evapora de la superficie con mayor rapidez que con la que puede aparecer en la superficie durante el proceso de exudación. Esto origina un desecamiento de la capa superficial del concreto (que a su vez conduce a una humedad y una rigidez diferencial entre la superficie y el interior de la masa), acompañada de una rápida contracción de secado (lo cual activa las fuerzas capilares en el agua de los poros del concreto) y el desarrollo de esfuerzos de tensión en la superficie que generan la formación de fisuras (en estado fresco, el concreto no presenta ninguna resistencia a la tracción).

La tasa de evaporación depende de la temperatura del aire, de la humedad relativa del ambiente que rodea a la estructura, de la temperatura que tenga la superficie del concreto y de la velocidad del viento sobre la misma superficie. Aunque se utilicen los mismos materiales, proporciones y métodos de mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado del concreto, pueden aparecer grietas de contracción plástica en un día determinado pero no en el siguiente, lo que con toda probabilidad es el resultado de cambios en las condiciones ambientales, que afectan la velocidad de evaporación de la humedad superficial del concreto.

#### **IV.4.2.2. Movimiento durante la construcción**

Los cambios volumétricos que experimenta el concreto durante la construcción, usualmente obedecen a movimientos en el proceso de vaciado o en el proceso de fraguado y están ligados a deformaciones de la base de soporte o a movimientos de las cimbras.

- *Movimiento de la base.* Cuando la base de apoyo del concreto fresco (particularmente las bases granulares y pavimentos y pisos), experimentan deformaciones durante el vaciado o el fraguado de la mezcla (posiblemente por la inadecuada compactación o solidez), existe una alta probabilidad de que se causen planos de falla y fisuras que pueden tener connotaciones estructurales adversas.

En otros casos cuando el concreto ya ha sido colocado y compactado, pero se presentan vibraciones, impactos o movimientos de la misma base (por ejemplo, tránsito de vehículos u operaciones de excavación en zonas adyacentes o cercanas), también se pueden presentar fracturas y daños.

- *Movimientos de las cimbras.* Al igual que la base de apoyo, las cimbras también pueden experimentar deformaciones (causadas por la presencia que ejerce el mismo concreto fresco, por vibraciones o movimientos propios del proceso constructivo), que originan movimientos de la masa plástica que aún se encuentra en proceso de fraguado y sin ninguna capacidad de resistir tensiones, con la consecuente aparición de fisuras. Desde luego, cuando se retarda el fraguado del concreto, hay mayor susceptibilidad a que se presenten fisuras por este concepto.

Otros daños ocasionados, a la masa de concreto, es la remoción prematura de las cimbras, que también causan fisuras, desprendimientos y desportillamiento en los elementos de concreto que están todavía en fase de fraguado o recién inicia la fase de endurecimiento.

#### **IV.4.2.3. Fisuras por heladas tempranas**

Cuando el concreto se encuentra en proceso de fraguado y se presenta una refrigeración significativa del ambiente (por descenso dramático de la temperatura), no sólo se puede detener el proceso de fraguado (el cual se bloquea a los 4°C de temperatura en el concreto), sino que también puede ocurrir el congelamiento del agua que se encuentra dentro del concreto y por ello, la fractura de los enlaces establecidos por los geles de cemento hidratado.



Este es un fenómeno poco común en los climas tropicales (a no ser que haya presencia de nieve perpetua).

#### IV.4.3. CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO ENDURECIDO

Durante el estado endurecido, los cambios volumétricos del concreto generalmente están asociados a la contracción o dilatación que experimenta el material por cambios de humedad y/o por cambios de temperatura; o los cambios que tienen lugar en la propia masa endurecida.

##### IV.4.3.1. Fisuras por cambios de humedad

Entre los mecanismos de daño causados por los cambios de humedad o por la presencia permanente de agua dentro del concreto en estado endurecido, se encuentran las grietas capilares o cuarteaduras; la contracción por secado, los agregados con retracción; y los ciclos de humedecimiento y secado. Todas estas también son fisuras, que se presentan sólo en la pasta de cemento, es decir que no atraviesan el agregado sino que lo rodean.

Durante el proceso de fraguado e inclusive posteriormente, las **grietas capilares o cuarteaduras**, que algunas veces aparecen sobre la superficie del concreto en distribución hexagonal (fisuración en mapa), se deben principalmente a procedimientos incorrectos de consolidación, acabado y curado.

Las causas más comunes de este tipo de grietas, son la sobre-vibración (segregación del concreto durante la compactación) o el excesivo aplanado que durante el acabado provoca el avance de agua, cemento y la fracción más fina de agregado hacia la superficie. Este material húmedo y cohesivo, tiene una contracción por secado mucho más alta y resistencia mucho más baja que el mortero y el concreto subyacentes, lo cual hace que al desecarse, la superficie esté sujeta a esfuerzos de tensión que son superiores a su resistencia a la tracción generando cuarteaduras y grietas que suelen aparecer entre 1 y 15 días después del vaciado. Su profundidad rara vez llega a 1 cm y por tanto tienen poca trascendencia estructural.

Otra práctica equivocada y común, que también causa este tipo de grietas es el riego de cemento seco sobre la superficie humedad del concreto para secarlo antes de alisarlo, lo cual genera una inusitada riqueza de la pasta superficial que induce las cuarteaduras al secarse.

La **contracción por secado**, también conocida como “**retracción hidráulica**”, consiste en la admisión de volumen que experimenta el concreto endurecido, cuando está expuesto al aire con humedad no saturada. En términos generales, es debido a reacciones químicas y a la reducción de humedad.

Una vez que el concreto endurecido se expone a la acción del aire, la mayor parte del agua evaporable de la mezcla se libera (lo cual depende de la velocidad y perfección del secado, de la temperatura y de las condiciones del medio ambiente). Al secarse el concreto, su volumen se reduce (contracción por secado), por efecto de la tensión capilar que se desarrolla en el agua que queda en el concreto.

Por el contrario, si el endurecimiento se efectúa baja agua, el concreto se dilata, recuperando gran parte de la pérdida de volumen debido a la retracción anterior. Cuanto más rico en cemento es el concreto, tanto mayor es la contracción o dilatación, según sea el caso. Pero, el principal actor que determina la cuantía de la contracción final es el contenido de agua de mezclado por volumen unitario de concreto, pues a mayor contenido de agua evaporable mayor es la contracción.

El valor de la contracción final para concretos normales, suele ser del orden de 0.2 a 0.7 mm por metro lineal, según el contenido inicial de agua, la temperatura ambiente, las condiciones de humedad y la naturaleza de los agregados. La contracción por secado puede permanecer por muchos meses aunque a ritmo decreciente, dependiendo de la forma del elemento y es una propiedad perjudicial del concreto si no se controla adecuadamente. Esto es especialmente importante en el caso de muros, losas de piso y pavimentos, ya que hay una gran área expuesta a la atmósfera en relación con el volumen total de la masa de concreto. Con una contracción del 0.05%, el concreto se acorta aproximadamente 1.5 mm en 3.0 metros lineales, y si se restringe este fenómeno, invariablemente se agrietará.

Por lo anterior, el agrietamiento debido de contracciones por secado puede y debe controlarse en gran medida con la ayuda del acero de refuerzo. Como es lógico, las varillas de diámetro pequeño con espaciamiento cerrado (parrillas o mallas electrosoldadas) son más efectivas para controlar el agrietamiento que las varillas de diámetro grande con espaciamiento mayor, aunque se utilicen los mismos porcentajes de acero.

#### IV.4.3.2. Fisuras por cambios de temperatura

Como mecanismos de daño inherentes a los cambios de temperatura se encuentran: la contracción térmica inicial; la dilatación y contracción por temperatura (variaciones estacionales); los ciclos de congelamiento y deshielo; y el ataque por fuego (choque térmico). Con estos mecanismos de daño, las únicas fisuras que se presentan afectan sólo en la pasta de cemento, es decir, no atraviesan el agregado sino que lo rodean, son aquellas causadas por la contracción térmica inicial.

Entre los mecanismos de daño causados por cambios de temperatura, está en primera instancia la **contracción térmica inicial** del concreto que procede esencialmente del calor de hidratación derivado de la reacción de hidratación del cemento. En condiciones normales, el concreto no disipa el calor a suficiente velocidad y alcanza temperaturas muy altas que el ambiente (hasta 65°C).

Normalmente, aparecen como microfisuras entre el primer y quinto día de edad y se generan por un enfriamiento superficial más rápido que el interior de la masa, lo cual provoca un estado de tensión en la zona superficial y un estado de compresión en el núcleo (podría ser el caso de descenso de temperatura nocturno). Estos planos de falla posteriormente pueden acentuarse por contracción de secado.

Hay una modalidad de fisuras de contracción térmica inicial, que puede darse en climas cálidos, cuando existe una alta temperatura (más de 50°C) en la cimbra de apoyo del elemento, antes del vaciado del concreto. Esta condición, puede acentuar la pérdida de humedad superficial de la mezcla (por evaporación), generando tensión superficial de la masa en contacto con la cimbra.

El concreto, como la mayoría de los materiales de construcción, se **dilata** con los aumentos de temperatura y se **contrae** cuando está baja. Los efectos de tales cambios de volumen son semejantes a los producidos por la contracción por secado, es decir, que el aumento o reducción de la temperatura puede producir un agrietamiento indebido y particularmente cuando el libre movimiento esté restringido por alguna causa o se combina por la contracción por secado.



**Foto IV.2.** Cambio de volumen por efecto de la temperatura. Los dos materiales poseen coeficientes de dilatación diferentes, por lo tanto, se desprende el material más débil.

Otro efecto importante de la temperatura es el alabeo por gradiente térmico que depende de la cantidad de energía radiante absorbida por la superficie del concreto. Un caso típico de esta situación nuevamente son los pavimentos de concreto, en donde, durante el día, la cara superior de la losa se encuentra a una temperatura mayor que la inferior, con lo cual la primera se dilata más que la segunda. Esta diferencia de alargamiento produce un alabeo de las placas con concavidad hacia abajo, como se muestra en la figura IV.23. Sin embargo, el peso propio del concreto y los esfuerzos del tráfico tienden a impedir esta deformación, produciendo esfuerzos de flexión, lo cual se traduce en esfuerzos de tracción en la cara inferior de la losa y de compresión en la cara superior.

Al observar la misma figura, durante la noche, el gradiente de temperatura se invierte (cara superior más fría que la inferior), dando lugar a un estado de tensiones contrario al del día. Esta situación es especialmente importante en regiones, en donde hay bruscos descensos de temperatura entre el día y la noche e inclusive dentro del mismo día.

Este mismo fenómeno se da en una losa de cubierta expuesta a los rayos directos del sol, la cual puede alcanzar los  $48^{\circ}\text{C}$ , mientras que el lado inferior de la cubierta puede ser de solamente  $26^{\circ}\text{C}$  una diferencia de  $22^{\circ}\text{C}$ . Esto provoca que la superficie de arriba tienda a expandirse más que la superficie de abajo. Esto da como resultado un movimiento hacia arriba durante el calentamiento, y un movimiento hacia abajo durante el enfriamiento, como se muestra en la figura IV.24.

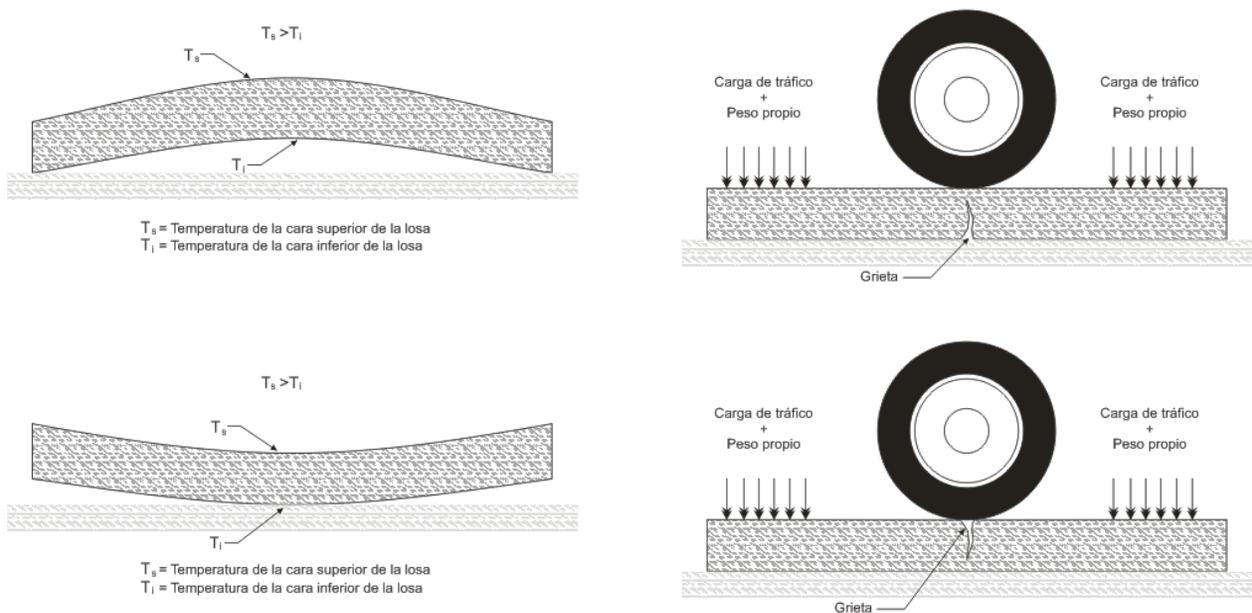
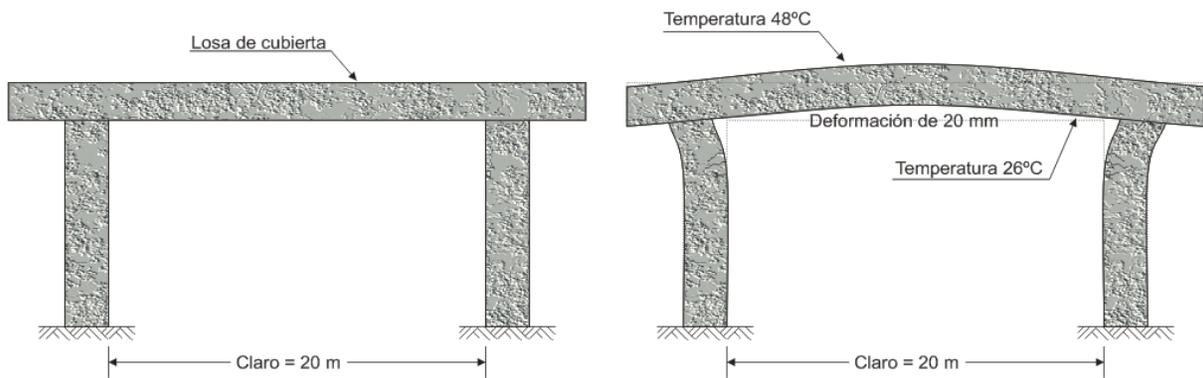


Figura IV.23. Efecto del alabeo diurno y nocturno de un pavimento de concreto.

Por ejemplo, en un elemento prefabricado con forma de doble T con un claro de 20 m puede moverse hacia arriba 20 mm a la mitad del claro por el calentamiento solar normal, haciendo que los extremos giren e impongan un esfuerzo en los cojinetes de apoyo de la viga del larguero del concreto.



(a) Estructura de concreto sin deformación

(b) Estructura de concreto deformada por diferencias térmicas

Figura IV.24. Alabeo en losa de cubierta causado por diferencias térmicas.

El coeficiente de dilatación térmica del concreto varía según el tipo de agregado y la riqueza de la mezcla. Generalmente está dentro del margen de 0.007 a 0.011 mm/m/°C. Los fenómenos de agrietamiento por temperatura, al igual que los de contracción por secado, se controlan con la ayuda de acero de refuerzo y para ello, el valor del coeficiente de dilatación térmica más comúnmente aceptado para el cálculo de las tensiones y deformaciones es de 0.010 mm/m/°C.

En países donde hay estaciones y en estructuras donde hay posibilidad de heladas (cuartos fríos, frigoríficos, zonas de congelados, etc.), **el congelamiento y deshielo** es considerado uno de los factores físicos más destructivos del concreto, especialmente cuando el material mantiene un estado de saturación casi completo.



El mecanismo de falla por los ciclos de congelamiento y deshielo, se da cuando el agua que se haya en los poros del concreto al llegar al punto de congelación aumenta de volumen (aproximadamente un 9% con relación a su volumen en estado líquido), y ello induce grandes esfuerzos de tensión al interior de la pasta y de las partículas del agregado que hace que la masa se fracture por su baja capacidad mecánica de tolerar tensiones.

Hasta la fecha, existe consenso en que la pasta de cemento endurecida y los agregados se comportan de manera diferente cuando son sometidos a congelamiento cíclico. Dentro de las investigaciones de Powers y Helmuth, se estableció que el agua de una pasta de cemento se encuentra en forma de solución alcalina ligera y que si la temperatura del concreto cae por debajo del punto de congelación, se produce de forma inmediata un período de superenfriamiento en los que se forman cristales de hielo en los poros y capilares de mayor tamaño de la pasta (macroporos y poros capilares).

Como consecuencia de lo anterior, el contenido de álcalis aumenta en la porción de la solución aún no congelada que se encuentra en los macroporos y los poros capilares, creado un potencial osmótico que obliga a las moléculas de agua, que se hallan en los poros cercanos, a difundirlas en la solución de cavidades congeladas. Como resultado la solución que está en contacto con el hielo se diluye permitiendo que el corpúsculo de hielo crezca aún más. En el momento en que la cavidad se encuentra llena de hielo y solución, cualquier crecimiento produce una presión de dilatación provocando que la pasta falle.

Por otra parte, la mayoría de los agregados pétreos naturales tienen poros muy grandes que la pasta de cemento endurecida (con cualquier relación agua/cemento), y Powers encontró que expelen agua durante la congelación. En este caso, el daño causado se debe a presión hidráulica que se genera en los poros debido al movimiento del agua.

#### IV.4.3.3. Ataque por fuego

En general el concreto tiene buenas propiedades de resistencia al fuego, pues el período de tiempo en el cual el concreto mantiene un comportamiento satisfactorio bajo la acción del fuego, es relativamente alto (si el concreto está en equilibrio higrométrico con el aire) y no hay emisión de humos tóxicos. Los criterios importantes de su comportamiento bajo la acción del fuego son: la resistencia la penetración de la llama; la resistencia a la trasmisión de calor; y la capacidad de sostener carga.

De acuerdo con muchos autores, con agregados pétreos naturales (como los calizos y los silíceos), el concreto al verse afectado por el fuego y según las temperaturas alcanzadas, puede sufrir calcinación que se manifiesta mediante cambios en su coloración como los que se muestran en la figura IV.25. En general, hasta los 300°C puede mantener su color gris natural; entre los 300°C y los 600°C, adquiere una coloración rosada o con tonos ocre (amarillento); entre 600°C y 900°C, puede ser de color gris claro; y por encima de los 900°C, experimenta una coloración blanca o amarilla clara.

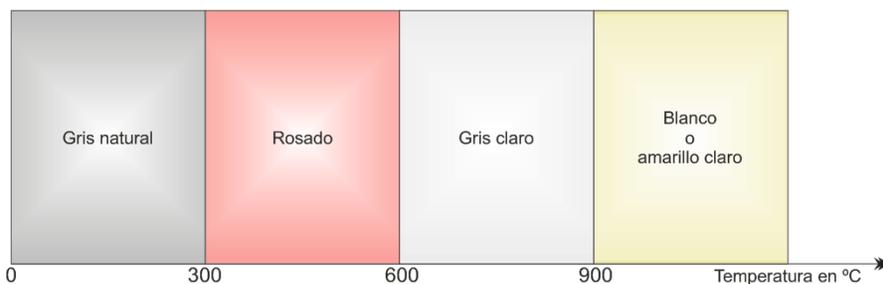


Figura IV.25. Cambio de color del concreto según la temperatura alcanzada.

Desde luego el grado de calcinación, afecta la microestructura del concreto porque se produce descarbonatación y aumento de la porosidad abierta por microfisuramiento, y por lo tanto, también puede verse afectada su resistencia mecánica. Por ejemplo, como consecuencia de los diferentes grados de penetración de la llama que puede experimentar el concreto, por la combustión de uno o varios materiales sobre o muy cerca de la superficie, esta puede exhibir distintos grados de calcinación que causan cambios de color superficial que a su vez se puede clasificar de la siguiente manera:

- *Calcinación incipiente.* Zonas donde el hormigón mantiene su coloración gris natural y exhibe microfisuras y cuarteaduras en mapa.
- *Calcinación superficial.* Zonas donde se percibe una coloración amarillenta y es posible que exista algún grado de carbonatación, con manifestaciones de fisuramiento térmico por alabeo.
- *Calcinación avanzada.* Zonas donde se percibe una coloración gris clara y con seguridad hay carbonatación avanzada con manifestaciones de pérdida de masa por descascaramiento.
- *Calcinación muy avanzada.* Zonas donde se percibe una coloración muy clara o blanco con carbonatación evidente y desintegración de la masa del concreto.

Cuando el concreto que protege el refuerzo de un elemento estructural queda expuesto a la acción del fuego, se pueden introducir altos gradientes de temperatura y en consecuencia, las capas calientes superficiales tienden a separarse y descascarse desde la parte interior de la masa, que está más fría.

Esto es altamente influido por el grado de humedad o la presencia de agua. Una excesiva humedad en el momento del fuego (lo cual puede provenir de la acción de los bomberos), es la primera causa de descascaramiento. Si el concreto esta en equilibrio higrométrico con el aire no hay descascaramiento.

Por otra parte, el fuego fomenta la formación de grietas en las zonas de juntas, en sitios que exhiban diferencias de compactación y en los planos de las varillas de refuerzo. En general, al quedar el refuerzo al descubierto, éste conduce el calor y acelera la acción del fuego y la transmisión de calor. Por lo tanto, los recubrimientos deben ser adecuados y el concreto de muy baja permeabilidad, con el objeto de que no se presente humedad en el momento de un incendio.

En cuanto a la capacidad de sostener carga del concreto hay que considerar que el ataque por fuego es un fenómeno muy complejo, por cuanto éste actúa sobre el material compuesto concreto-acero, con comportamientos y reacciones muy diferentes ante la elevación de temperaturas. Está comprobado que al aumentar la temperatura del concreto, se registra un descenso de su resistencia y módulo de elasticidad, pero acompañado de importantes incrementos en su deformación unitaria que conduce a fisuramientos. El fuego afecta gravemente el acero de refuerzo, pero el aspecto más crítico es la alteración de su adherencia entre el acero y el concreto para temperaturas superiores a los 300°C.

Por ejemplo, como consecuencia de los diversos grados de intensidad que experimenta el fuego, en función del tipo de material que arde y su permanencia sobre la superficie del concreto, se pueden presentar diferentes cambios volumétricos en el concreto que lo hacen experimentar tracciones. Estos esfuerzos a su vez, inician y/o propagan microfisuras, fisuras y grietas. Estas situaciones se evidencian, por patrones de fracturamiento y por planos de falla como los siguientes:



- *Microfisuras y cuarteaduras en mapa.* Típicas de zonas donde el concreto experimenta calcinación incipiente. Es decir, presencia de planos de falla por dilatación-contracción térmica.
- *Fisuramiento térmico por alabeo.* Propio de zonas en losas de piso (o en muros) que experimentan alabeo convexo en su superficie, como consecuencia del calor excesivo que dilata la parte superior y produce fracturas en los tercios medios centrales de la losa. Este tipo de fracturas, es propio de zonas donde el concreto experimenta calcinación incipiente y calcinación superficial.
- *Fisuramiento por choque térmico (tracción térmica).* El patrón de estos planos de falla se desarrolla típicamente en los bordes de losas que experimentan cambios dramáticos de temperatura durante la conflagración o aún después (considerada la baja conductividad térmica del hormigón). Es decir, fallas de tracción excesiva como consecuencia del choque térmico que experimentarán algunas losas (probablemente por la refrigeración súbita causada por el agua de los bomberos o los cambios volumétricos en cortos lapsos de tiempo).
- *Delaminación y descascaramiento.* Planos de falla caracterizados por desprendimientos superficiales de forma laminar, propios de zonas donde puede existir presencia de humedad al momento del fuego y/o se percibe carbonatación avanzada con manifestaciones de pérdida de masa.
- *Desintegración por fatiga.* Propia de todas las zonas donde ocurre carbonatación y desintegración de la masa de concreto.

#### IV.4.3.4. Cambios de la masa endurecida

Como manifestaciones de daño que tienen relación con los cambios que experimentan los cambios de masa endurecida, se encuentran, los cambios en el peso unitario (disminución); los cambios en la porosidad (aumento); y los cambios en la permeabilidad (aumento). Usualmente, estos cambios suelen darse por acciones mecánicas o por reacciones químicas.

Las acciones mecánicas contemplan aspectos como: los impactos y la abrasión, que pueden microfisurar y/o desgastar la integridad del concreto.

Las reacciones químicas pueden ser reacciones que desintegran la pasta de cemento (como el ataque de ácidos); solubilizar la pasta de cemento (como la carbonatación); o causar expansiones (como la reacciones álcali-agregado, el ataque de sulfatos y la hinchazón del acero de refuerzo por corrosión).

### IV.5. ACCIONES QUÍMICAS

El ataque, degradación y/o desintegración del concreto, como consecuencia de su contacto con sustancias químicas agresiva que se pueden encontrar en forma líquida, gaseosa y aún sólida, es uno de los temas más estudiados dentro de la patología del concreto, en los últimos años. Las acciones químicas sobre el concreto, están muy ligadas a las condiciones de exposición y sobre todo al microclima que rodea a la superficie del concreto.

Como mecanismos de deterioro del concreto por reacciones químicas de éste ante un agente agresor, se pueden mencionar: las reacciones que provoca la descomposición y el lavado (lixiviación) de los compuestos de la pasta de cemento endurecida; las reacciones de intercambio entre el agente agresivo y la pasta de cemento endurecido que generan productos solubles e

insolubles no expansivos; y las reacciones que forman nuevos productos que son expansivos (véase figura IV.26).

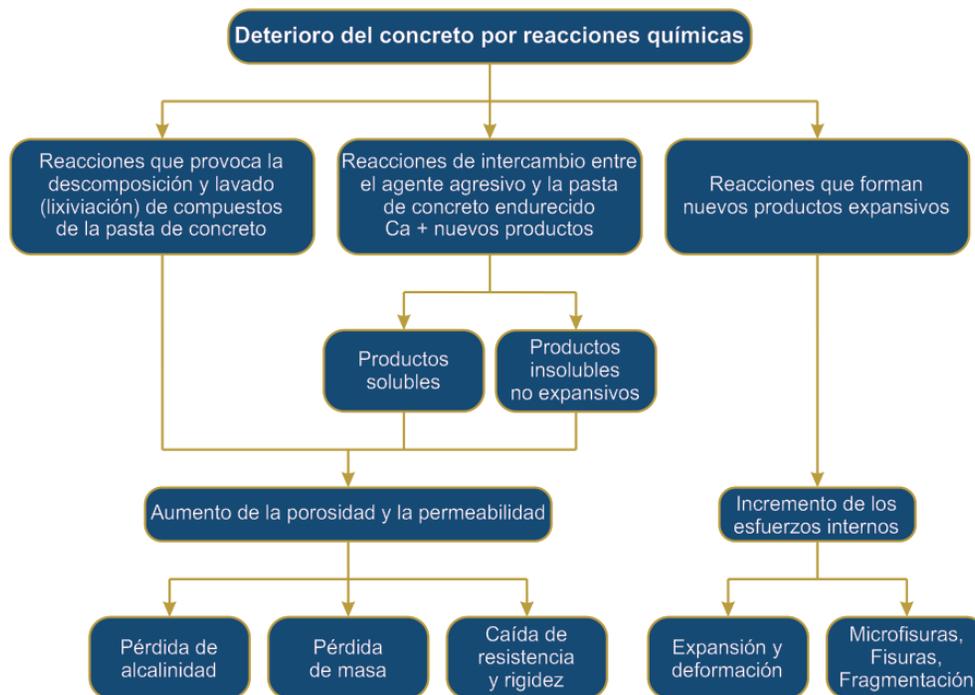


Figura IV.26. Deterioro del concreto por reacciones químicas.

En todas estas reacciones, las sustancias agresivas (iones y moléculas), se trasladan desde la fuente contaminante, usualmente desde el medio ambiente (aire o líquido), hasta la superficie o interior de la masa, donde se desarrollan las reacciones químicas a que haya lugar, con las diferentes sustancias reactivas del concreto.

En general, las reacciones entre las sustancias agresivas y las sustancias reactivas del concreto, tienen lugar tan pronto éstas se ponen en contacto. Sin embargo, dependiendo de la concentración y velocidad de transporte de las sustancias agresivas (tanto del exterior como a través del interior del propio concreto), estas reacciones pueden presentar manifestaciones inmediatas, o daños en un largo plazo. Pero además, como ya se mencionó en el primer capítulo, la presencia de humedad, las condiciones de temperatura y el estado de la presión, también tienen una alta incidencia sobre la velocidad de las reacciones químicas que se efectúan.

Es importante considerar que la vulnerabilidad del concreto a ataques químicos depende básicamente de la porosidad, alcalinidad y reactividad de los compuestos hidratados del cemento.

Dentro de los factores de deterioro imputables a las acciones químicas están, el ataque de ácidos, la lixiviación por aguas blandas, la carbonatación, la formación de sales expansivas (ataque de sulfatos), y la exposición destructiva de las reacciones álcali-agregado.

#### IV.5.1. ATAQUE DE ÁCIDOS

Es un hecho bien conocido que la pasta de cemento portland endurecida, es el elemento que mantienen adherido al concreto, éste es un material silico-calcáreo con un fuerte carácter básico, cuyo pH es del orden de 13 y, por lo tanto, susceptible al ataque de cualquier vapor de ácido o ácido líquido, por débil que desee éste.



El mecanismo de deterioro del concreto causado por ácidos, generalmente es el resultado de una reacción entre estas sustancias (agente agresor) y todos los compuestos cálcicos (hidróxido de calcio, silicato hidratado y aluminato cálcico hidratado), del cemento portland hidratado, que se convierte en sales cálcicas de ácido actuante.

Por ejemplo, entre los ácidos inorgánicos, el ácido clorhídrico origina cloruro cálcico, el cual es muy soluble; la acción del ácido sulfúrico produce sulfato de calcio, que se precipita como yeso; y el ácido nítrico, da como resultado nitrato de calcio, que también es muy soluble. Con los ácidos orgánicos sucede algo similar; por ejemplo, la acción del ácido láctico produce lactatos cálcicos y el ácido acético da lugar al acetato cálcico. En la tabla IV.1, se indican los principales ácidos inorgánicos, orgánicos y minerales que son dañinos para el concreto.

Acidos inorgánicos y minerales
Ácido clorhídrico
Ácido brómico
Ácido carbónico
Ácido de cromo
Ácido fluorhídrico
Ácido fosfórico
Hidrogeno sulfurado
Ácido nítrico
Ácido sulfúrico
Ácido sulfuroso
Ácidos orgánicos
Ácido acético
Ácido fórmico
Ácido láctico
Fenol
Ácido tánico
Ácido butílico
Ácido úrico
Micro-organismos
Ácido húmico

Tabla IV.1. Ácidos y sustancias dañinas para el concreto.

Por lo anterior, no existen los concretos resistentes a los ácidos y por ello, deben protegerse de su acción mediante barreras impermeables y resistentes que los protejan del contacto directo.

La velocidad de la reacción de la pasta de cemento del concreto con los diferentes ácidos inorgánicos y orgánicos, desde luego está determinada por la agresividad del ácido atacante; pero, la solubilidad de la sal cálcica resultante es la que determina la velocidad de degradación del concreto. Si la sal cálcica es muy soluble, esta fluye y, por lo tanto, el deterioro es más rápido. En la tabla IV.2, se indica la velocidad de ataque de ciertos ácidos a temperatura ambiente.

Entre las muchas sustancias que se encuentran en el medio ambiente que rodea una estructura y que pueden derivar en ácidos que atacan el concreto se tienen las siguientes:

- Los productos de combustión de un gran número de combustibles contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad y forman ácido sulfúrico.
- Al agua de algunas minas, algunas aguas industriales y las aguas residuales o negras, pueden contener o formar ácidos, particularmente ácidos sulfúricos y sulfurosos.

Velocidad del ataque a temperatura ambiente	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Varios
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fólico Láctico		Cloruro de aluminio	
Moderado	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio <20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gas) Sulfito líquido
Lenta	Carbónico		Hidróxido de sodio 10 – 20 % Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro (gas) Agua de mar Agua dulce
Despreciable		Oxálico tartánico	Hidróxido de sodio >10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amoniaco líquido

**Tabla IV.2.** Efecto de sustancias químicas comunes en el concreto.

- Los suelos que contengan turbas pueden tener sulfuro de hierro (pirita), que al oxidarse producen ácido sulfúrico, con el agravante de algunas reacción posterior pueden producir sales sulfatadas, que a su vez producirán ataque por sulfatos.
- Las corrientes de agua en regiones montañosas, son a veces ligeramente ácidas debido a que contienen bióxido de carbono libre disuelto, o algunos ácidos orgánicos. El ácido carbónico, disuelve la cal de concreto, más no la alúmina. Las aguas blandas, al igual que los ácidos, disuelven los compuestos cálcicos del concreto; por lo tanto, el resultado es la degradación y destrucción de la pasta de cemento.
- Los ensilajes agrícolas, industrias manufactureras o de procesamiento tales como: fermentadoras, lecherías, destilerías, producción de jugo cítrico, carnicerías, productos de pulpa de madera, o caña de azúcar, producen ácidos orgánicos, que también agreden al concreto.

#### IV.5.2. LIXIVIACIÓN POR AGUAS BLANDAS

Las aguas blandas, es decir, aquellas que contengan pocas impurezas (por ejemplo, aguas libres de sales, aguas de condensación industrial, aguas de fusión de glaciares, nieve o lluvia y algunas aguas de pantano o subterráneas), disuelven los componentes cálcicos del concreto de igual manera que los ácidos; y por lo tanto el resultado es la descomposición y lixiviación de la pasta de cemento endurecida.

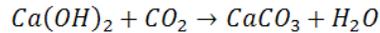
La lixiviación de hidróxido de calcio que contiene el concreto, es decir la disminución del contenido de CaO, trae como consecuencia la degradación de los otros componentes de la pasta hidratada (silicatos, aluminatos y ferritos) y por ello el concreto pierde resistencia y se desintegra.

#### IV.5.3. CARBONATACIÓN

La carbonatación, es un tipo particular de reacción ácida, pero de excepcional importancia en la durabilidad del concreto. Se debe a la penetración por difusión del bióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) del aire atmosférico o del suelo, en la estructura porosa de la superficie del concreto. El proceso origina los siguientes fenómenos:



- El gas carbónico se disuelve en alguno de los poros y reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuso del concreto produciendo ácido carbónico.
- El ácido carbónico, convierte el hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , liberado y depositado en los poros durante la hidratación del cemento (conocido como la cal libre del cemento) en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y agua. La reacción tienen la siguiente forma:



- Ocurre un descenso significativo del pH en la capa superficial del concreto (de su valor usual de 13, baja hasta valores del orden de 9), y al perder su basicidad deja de ser un elemento protector de la corrosión del acero de refuerzo. Es decir, que a medida que avanza la penetración de la carbonatación, conocida como «frente de carbonatación», se pierde el efecto de la capa pasivadora que tiene el recubrimiento del concreto.
- Tiene lugar una retracción adicional en el concreto (como consecuencia de la disminución que se da en el volumen de la pasta de cemento), conocida como «contracción por carbonatación». Esta contracción adicional, se suma a la contracción por secado.

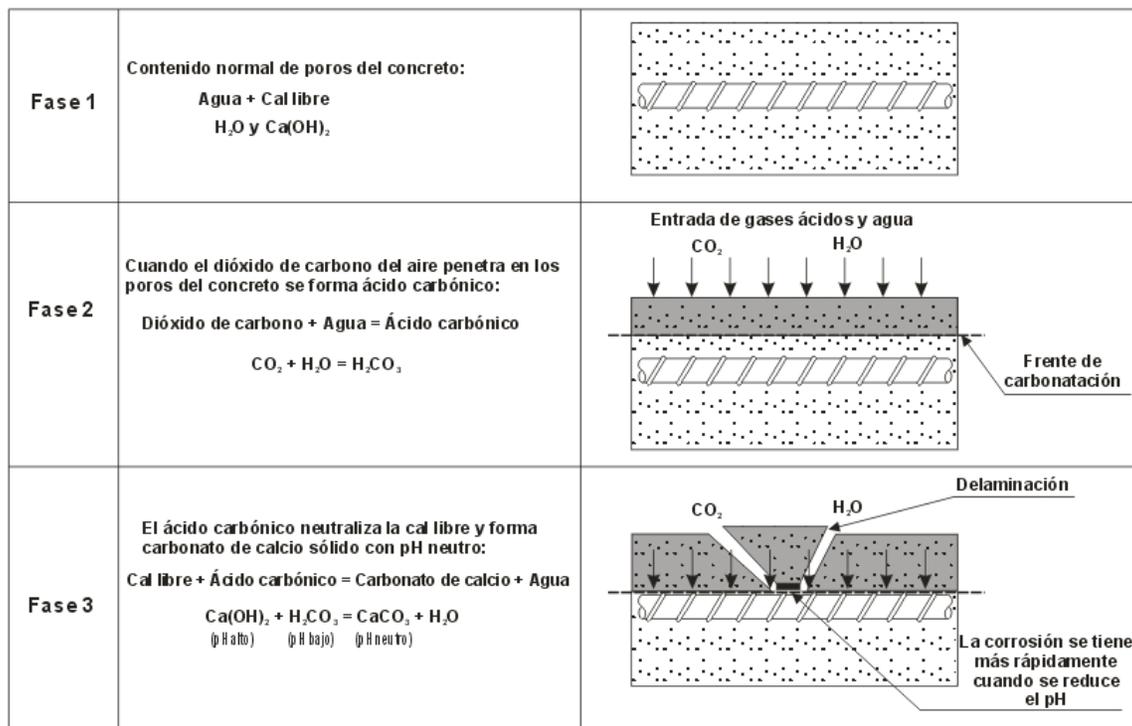
El proceso es más intenso, cuanto más importante son los cambios de humedad y más elevada la temperatura. Este fenómeno también se presenta de manera significativa en ambientes cuya humedad relativa se encuentra entre 65% y 98%. Si el concreto permanece saturado o está permanentemente seco, no hay carbonatación. Por otra parte, el proceso también es más intenso en la medida en que sea mayor la permeabilidad del concreto.

Originalmente se considera que la carbonatación podría ocurrir solamente por penetración de  $\text{CO}_2$  del aire atmosférico; sin embargo, también se ha comprobado que puede suceder por presencia de  $\text{CO}_2$  en el suelo. En este último caso, puede suceder que la lluvia absorba dióxido de carbono y penetre en el suelo en forma de ácido carbónico; o que en las aguas freáticas o subterráneas esté presente éste ácido; o simplemente que se aporte  $\text{CO}_2$  adicional a través del ácido húmico que se forma por descomposición de la materia orgánica.

De cualquier manera, lo anterior conduce a que puede haber  $\text{CO}_2$  en el suelo y que éste penetre en el concreto. Sobre el particular algunos investigadores han concluido que si el agua freática, contiene más de 20 mg/l de  $\text{CO}_2$  y está relativamente quieta o contienen más de 10 mg/l de  $\text{CO}_2$  pero está en movimiento, ello puede producir una carbonatación apreciable de la pasta de cemento, si hay ciclos de humedecimiento y secado (véase figura IV.27).

La velocidad a la cual avanza el frente de carbonatación, así como la profundidad del mismo, depende de muchas variables, pero entre ellas se puede mencionar las siguientes:

- La cantidad de  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera cercana a la superficie del concreto y su velocidad de difusión al interior del concreto.
- La humedad relativa, la temperatura y presión del medio ambiente. La difusión del  $\text{CO}_2$  sólo es posible en poros llenos de aire, por ello el concreto no se carbonata cuando está totalmente saturado de agua.



**Figura IV.27.** Reacciones básicas de la carbonatación.

- La relación agua/cemento.
- La compactación de la capa de recubrimiento del concreto. El tamaño y volumen de los macroporos y los poros capilares del concreto y/o la presencia de microfisuras, fisuras y planos de falla. El concreto permeable se carbonata más rápidamente.
- El tiempo y perfección de los procedimientos de curado del concreto. Se ha comprobado que la carbonatación es mayor, en la medida en que el tiempo de curado haya sido menor.

La forma más fácil de detectar la carbonatación es rompiendo un pedazo del concreto (seco y preferiblemente cerca de un borde) donde se sospeche que existe el problema. Después de retirar todo residuo de polvo del sustrato se rocía una solución de fenolftaleína al 1 ó 2% en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas de concreto (pH menor a 8) no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor a 9.5 adquirirán un color rojo purpura brillante; este cambio de color muestra hasta donde se ha llegado el avance del frente de carbonatación dentro del concreto. Existen otros métodos e indicadores (tilmofltaleína, alizarina) para detectar la carbonatación.

#### **IV.5.4. ATAQUE DE SULFATOS**

De acuerdo con Neville, las consecuencias del ataque de sulfatos no sólo producen degradación por expansión y fisuración, sino también una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento. Desde luego, lo anterior también conlleva una pérdida de adherencia entre la pasta de cemento a las partículas de los agregados. El deterioro por lo general, comienza en las aristas o esquinas agudas, siguiendo una microfisuración y una fisuración que astillan el concreto y lo reducen a una combinación friable y blanda.



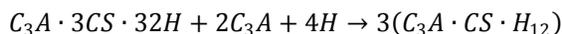
Algunos sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio que están naturalmente en el suelo o disueltos en el agua freática o en la atmósfera pueden acumularse sobre la superficie del concreto incrementando su concentración y, por lo tanto, el riesgo de deterioro. Los mecanismos que intervienen en el ataque del concreto por sulfatos, son dos reacciones químicas:

- Combinación de los sulfatos con hidróxido de calcio (cal libre), que forman sulfato de calcio (yeso).
- Combinación de yeso con aluminato hidratado de calcio para formar sulfoaluminato de calcio (etringita).

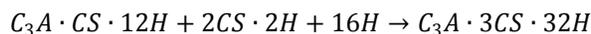
Estas dos reacciones tienen como resultado un aumento del volumen del sólido (en aproximadamente un 18%) y a la segunda se le atribuye la mayoría de las expansiones, rupturas y ablandamiento del concreto causadas por soluciones de sulfatos.

La cantidad de yeso incorporada al cemento para regular la velocidad de fraguado reacciona con los aluminatos cálcicos durante la hidratación, formando etringita. Este es uno de los productos a los que se asocia la expansión del concreto, y cuya fórmula es  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , que se abrevia  $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CS}\cdot 32\text{H}$  (donde CS corresponde al sulfato de calcio). Otro compuesto es el monosulfato, con fórmula  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (donde  $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CS}\cdot 12\text{H}$  es la fórmula abreviada). El monosulfato es formado cuando la cantidad de yeso en el cemento no es suficiente para reaccionar con los aluminatos.

En presencia de agua suficiente, la etringita y el monosulfato dan lugar a las siguientes reacciones: la etringita reacciona con el aluminato tricálcico para formar monosulfatos;



Y en presencia de alguna fuente adicional de sulfatos, el monosulfato se transforma en etringita;



El ataque al concreto por sulfatos es más pronunciado en los bordes y esquinas, manifestándose un agrietamiento y descaramiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo. Visualmente presenta una apariencia blanquecina característica.

El ión sulfato que se expresa como  $(\text{SO}_4^{-2})$  y que causa la degradación del concreto proviene de origen natural, biológico o industrial.

Entre los sulfatos de origen natural, se puede mencionar algunos suelos orgánicos, suelos que contengan turbas, algunos suelos arcillosos o aguas freáticas de estos mismos suelos, que pueden producir sales sulfatadas. Los suelos en forma de sales más agresivas, son: el sulfato de amonio ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ), el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$  o yeso), el sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) y el sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ). Algunos sulfatos menos agresivos, pero de todas maneras dañinos son: el sulfato de cobre, el sulfato de aluminio y el sulfato de bario, que son insolubles en agua.

Otra fuente natural de sulfatos, es el agua de mar, que aparte de contener sales de sulfatos, está compuesta de otras sales, cuya acción en conjunto puede ser supremamente agresiva con el concreto. Entre las sales disueltas más comunes en el agua de mar están: cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ ) y sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Como sulfatos de origen biológico se pueden considerar aquellos que previene de la presencia de microorganismos sobre la superficie del concreto, o aguas residuales que experimentan descomposición biológica de carácter aeróbico en sustancias orgánicas albuminoides que habitualmente contienen proteínas y/o azufre. También, los abonos artificiales y el estiércol incrementan de forma importante el contenido de sulfatos en el suelo.

Entre los sulfatos de origen industrial, se destacan los que proceden de aguas residuales con derivados orgánicos e inorgánicos del azufre, especialmente sulfatos (agua doméstica) y sulfitos  $\text{SO}_3^{-2}$  (aguas industriales). También, están los que provienen de las plantas industriales y fabricas de fertilizantes, galvanizados, laboratorios fotográficos, coque u otros, los cuales penetran en el suelo y/o a las aguas subterráneas.

Por otra parte, en zonas industriales y en zonas urbanas donde hay combustión de carbón o gasolina con azufre, se libera bióxido de azufre que en presencia de oxígeno y humedad forman ácido sulfúrico. Las lluvias ácidas, también contienen sulfatos en forma de soluciones diluidas de ácido sulfúrico, el cual ataca la superficie de concreto endurecido.

Entre los factores que más contribuyen con la acción expansiva de los sulfatos, se encuentran los siguientes:

- Las combinaciones de exposición del concreto.
- La presencia de humedad.
- La permeabilidad del concreto, que influye en la velocidad de transporte de los iones de sulfato.
- La composición del concreto, principalmente el tipo y cantidad de cemento (contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ ).

La severidad en el ataque por sulfatos, es clasificado por ACI 318, bajo los siguientes requerimientos:

- Ataque despreciable. Cuando el contenido de sulfatos es menor al 0.1% en el suelo, o inferior a 150 partes por millón (mg/l) en agua. En esta caso no se impone restricción al tipo de cemento a usarse ni a la relación agua/cemento.
- Ataque moderado. Si la cantidad de sulfatos va de 0.1 a 0.2% en el suelo o de 150 a 1,500 mg/l en agua, se recomienda el uso de cemento portland con adición de puzolanas o escoria de alto horno. La relación agua/cemento debe ser menor a 0.5 para cemento normal.
- Ataque severo. Se considera para contenido de sulfatos de 0.2 a 2% en el suelo o de 1,500 a 10,000 mg/l en agua. Se debe usar cemento portland resistente a los sulfatos y relación agua/cemento menor de 0.45.
- Ataque muy severo. Cuando el contenido de sulfatos supera el 2% en el suelo o 10,000 mg/l en el agua. Es recomendable el uso de cemento resistente a los sulfatos con una mezcla de puzolanas.



Aunque el ión sulfato tiene poco efecto sobre la corrosión del acero de refuerzo, los agrietamientos producidos por las reacciones con la pasta de cemento permiten el acceso de agentes agresivos como bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y humedades, sustancias que aceleran la cinética de disolución de la varilla embebida.

Si los sulfatos se encuentran en el exterior del concreto, al penetrar a través del recubrimiento, provocan, en primer lugar una cierta expansión al formarse los sulfoaluminatos expansivos. Este agrietamiento superficial produce una mayor permeabilidad del mismo y una menor protección del acero de refuerzo que se puede corroer, no tanto por una despasivación como la que producen los cloruros, sino por el efecto que conlleva una degradación simultánea del recubrimiento.

Para conocer si el concreto contiene sulfatos se lleva a cabo la prueba de carbonatación, que consiste en aplicar una solución de alcohol etílico con fenolftaleína para observar la disminución de la alcalinidad del concreto mediante cambios de tonalidades. La carbonatación del concreto ocasiona una reducción del pH y como consecuencia, de los oxidrilos que son los que mantienen la pasividad del acero. Al haber carbonatación del concreto, se produce entonces una corrosión uniforme. Al aplicar la solución se podrá observar una tonalidad rojo púrpura si el pH del concreto se encuentra entre los valores normales de 12, rosa si ha bajado a un rango entre 9 y 12 y transparente si es menor que 9.

#### **IV.5.4.1. Ataque de los sulfatos a morteros**

Dejando aparte los fallos de ejecución y aquellos imputables a los materiales defectuosos, las más importantes que afectan a las obras de ladrillería son los ataques de los sulfatos a los morteros y a sus revestimientos de mortero; la retracción del fraguado; y la cristalización de las sales contenidas en la masa de las piezas cerámicas con la aparición de eflorescencias.

La agresión suele comenzar con la dilatación del mortero, lo que da ocasión a que aparezcan deformaciones y grietas en los paramentos del muro; en caso grave es posible que se presenten rupturas en los cantos de los ladrillos. El origen de este fenómeno se debe a una reacción de los sulfatos que contienen los ladrillos al combinarse con los aluminatos del mortero de cemento portland. La reacción se produce en presencia de agua, es decir, se trata de un defecto propio de las obras de fábrica que, por una u otra razón, están expuestas a la acción continua del agua y carecen de protección impermeable. Se trata de un caso bastante frecuente en los muros de cerramiento de ladrillo visto en los edificios urbanos, que degeneran con facilidad para convertirse en paramentos enfermos.

#### **IV.5.5. EXPANSIÓN DESTRUCTIVAS DE LAS REACCIONES ÁLCALI-AGREGADO**

Al estudiar las características y propiedades de los agregados, para el concreto, normalmente se menciona que estos deben ser materiales granulares, de buena granulometría, cuyas partículas deben tener una resistencia propia y que además deben ser inertes; es decir, que no deben experimentar ningún tipo de reacción con los otros componentes del concreto.

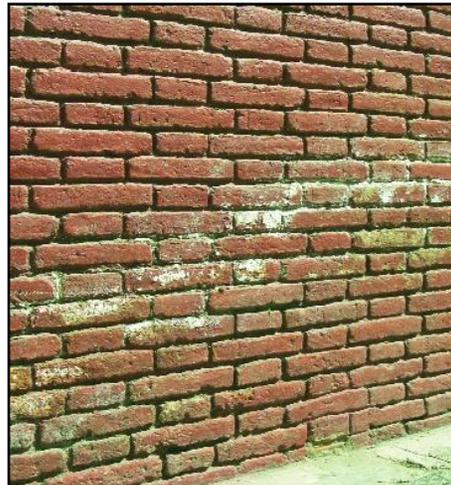


Foto IV.3. Ataque de sulfatos a un muro de fábrica.

Hacia el año de 1940, Thomas Stanton, demostró que ciertos y determinados agregados experimentan reacciones con la pasta de cemento, causando degradación, expansión y posterior agrietamiento en el concreto, bajo ciertas y determinadas condiciones del medio ambiente. Es decir, un proceso intrínseco de degradación del concreto, que originalmente se estableció, que obedecía a la combinación de cemento con alto contenido de álcalis (óxidos de sodio y óxidos de potasio), con ciertos agregados que contienen sílice inestable (según la naturaleza sea cristalina o amorfa). Desde entonces este fenómeno se conoce como «reacción álcali-agregado».

En el presente, la reacción álcali-agregado, se identifica como un proceso físico y químico, en el cual intervienen los hidróxidos alcalinos del concreto (que pueden ser aportados no solamente por el cemento, sino también por los mismos agregados u otras fuentes externas), y los minerales que constituyen la roca que se emplea como agregados (los cuales pueden estar en estado vítreo, criptocristalino, microcristalino y amorfo). Por ello, hoy en día, en la reacción álcali-agregado se distinguen tres modalidades que son: la reacción álcali-sílice; la reacción álcali-silicato; y la reacción álcali-carbonato (véase figura IV.28).



Figura IV.28. Modalidades de la reacción álcali-agregado.

El considerar únicamente el tipo de roca como criterio para evaluar el potencial de reactividad de la misma, puede ser erróneo; y por ello, varios autores sostienen que es mejor evaluar la presencia de los minerales que hay presentes en la roca misma. Por ello, en la tabla IV.3, se indican los agregados y minerales más potencialmente reactivos.



Agregados
Vidrios volcánicos
Riolitas
Latitas
Dacitas
Traquitas
Grawacas
Areniscas
Argilitas
Calizas dolomíticas
Filitas
Gnesis
Minerales
Cuarzo
Ópalo
Calcedonia
Tridimita
Cristobalita
Andesita
Heulandita
Dolomita

Tabla IV.3. Agregados y minerales potencialmente reactivos.

Para que se presenta la reacción álcali-agregado, deben conjugarse tres factores: a) la condición de concentración de NaOH y KOH en la solución que haya en los poros del concreto; b) la condición de potencialidad de reacción de los agregados; c) la condición de humedad del concreto. En la tabla IV.4, se pueden apreciar los niveles de riesgo para que se produzca la reacción álcali-agregado en el concreto, de acuerdo con la conjugación de los tres factores mencionados.

Nivel de riesgo	Condición de los solución de los poros		Condición de los agregados		Condición de exposición del concreto	
	Altos álcalis	Bajos álcalis	Reactivos	Inócuos	Húmedo	Seco
Riesgo alto	X		X		X	
Riesgo medio	X		X			X
Riesgo bajo		X	X		X	
Sin riesgo		X		X		X

Tabla IV.4. Nivel de riesgo para que se produzca la reacción álcali-agregado.

Como ya se mencionó la reacción álcali-agregado es un fenómeno de carácter expansivo, el cual produce agrietamientos, generando esfuerzos en el seno del concreto con la aparición de fisuras. La reacción tiene lugar en la unión de la pasta y el agregado reactivo, así como en pequeños poros y microfisuras. En ocasiones se genera un anillo en el contorno del agregado reactivo y en ciertos casos se presenta una exudación en la superficie del concreto que permite sea más visible el agrietamiento superficial del concreto.

La expansión del concreto tiene una influencia negativa en las propiedades mecánicas del mismo. El investigador Swamy en uno de sus trabajos, analizo el comportamiento de los concretos dosificados con agregados considerados como altamente reactivos, y otro como de reactividad moderada, la pérdida en la resistencia a la compresión simple la cual puede llegar a ser del 40% a 60% menor a la resistencia especificada de proyecto. De igual manera se tienen registros de una disminución de la resistencia de tensión alrededor del 65 a 80%. La pérdida de módulo de elasticidad se ha estimado entre 60 y 80%. La pérdida de resistencia y el módulo de elasticidad intervienen en la rigidez de los elementos y en consecuencia influyen en el comportamiento estructural y la durabilidad de las edificaciones.

La presencia de acero en el concreto es un elemento que interviene en el aspecto del agrietamiento, pues impone restricciones a la fisuración. Por la naturaleza expansiva del fenómeno y los esfuerzos creados en la masa del concreto, el aspecto de las fisuras generadas por el agrietamiento en elementos sin refuerzo será de forma casual e irregular, ocurriendo en todas direcciones, con aspecto como el de la piel de un cocodrilo, también conocido como «mapeo». En estructuras reforzadas, el panorama es diferente, pues las fisuras se presentan en forma paralela al acero principal y en dirección de los esfuerzos predominantes. La expansión creada en el concreto impone esfuerzos, que aunados a los esfuerzos de compresión del concreto contiguo al refuerzo le impone una restricción para deformarse, lo cual da lugar al nacimiento de fisuras paralelas a la posición del refuerzo, mismas que pueden llegar a tener un espesor de 15 mm y una profundidad de 30 cm, sobrepasando la capa de recubrimiento de los elementos.

Debido a que la humedad y temperatura favorecen el desarrollo de la reacción, el daño causado podrá variar en una estructura, pues los elementos que están en contacto con el medio ambiente serán más afectados que aquellos que se encuentran protegidos, aun cuando todos ellos estén contruidos con el mismo concreto.

#### **IV.5.5.1. Reacción Álcali-Sílice**

Como ya se mencionó, algunos tipos de agregados contienen formas reactivas de sílice, que pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos del concreto. Esta reacción se conoce como álcali-sílice y forma silicatos alcalinos en el gel de cemento, que son capaces de absorber agua en grandes cantidades y a través de procesos de ósmosis, ejercen grandes presiones en los poros de concreto causando fisuras.

El proceso suele manifestarse entre dos y cinco años de edad del concreto y puede iniciarse con una simple lixiviación de productos cristalinos de composición variable, proseguir con hinchamientos locales, o manifestarse mediante pequeñas fisuras superficiales distribuidas en forma irregular (fisuración por mapeo), seguida de progresión de planos de falla por fatiga y eventualmente desintegración de la masa.

Los principales factores que influyen en la expansión son los siguientes:

- La reactividad potencial de los agregados, basados en la presencia de sílice amorfa o parcialmente cristalizada.
- La cantidad y granulometría de las sustancias reactivas. Lo cual, no sólo incide en el valor de expansión que experimentan las partículas reactivas, sino también en la velocidad en que se da el fenómeno.
- La concentración de álcalis en el agua de los poros del concreto endurecido.
- El tipo de cemento.
- Las condiciones ambientales (especialmente la temperatura, que incrementa la velocidad con que se produce la reacción).
- La humedad presente. La expansión varía en función del porcentaje de humedad relativa del concreto. Por ejemplo, se ha comprobado que debajo del 70% de humedad la reacción expansiva y la expansión total no son significativas, pero, por encima del 80% de humedad relativa, la expansión se incrementa drásticamente.



Este tipo de reacción, suele suceder en dos etapas. En la primera ocurre una hidrólisis del sílice activando por OH que forma el gel álcali-silicoso. En la segunda etapa, se da la absorción de agua, lo cual hace que el gel aumente de volumen induciendo presiones internas que fracturan el agregado y la pasta de cemento circundante.

Desde, luego la expansión del concreto como consecuencia de la reacción álcali-sílice afecta de manera negativa las propiedades mecánicas del concreto mismo (pérdida de resistencia y merma del módulo de elasticidad).

#### **IV.5.5.2. Reacción Álcali-Silicato**

Una modalidad de reacción álcali-agregado, diferente a la reacción álcali-sílice, es la que se da entre ciertas rocas silíceas y los álcalis presentes en el concreto. Esta, es conocida como álcali-silicato, y los tipos de rocas que exhiben el fenómeno, son rocas sedimentarias con alto contenido de minerales de arcilla (las arcillas están compuestas por capas de silicatos), por lo cual presentan una estructura exfoliada. En este caso, la reacción es muy lenta.

#### **IV.5.5.3. Reacción Álcali-Carbonato**

Cuando se emplean agregados calizos del tipo dolomita se puede producir una reacción similar a la anterior conocida como álcali-carbonato. Esta reacción, consiste en la formación de brucita y en la regeneración de álcalis que cuando quedan expuestos a la humedad aumento de volumen induciendo esfuerzos internos de tensión dentro del concreto, que a su vez ocasionan fisuras.

La reacción se manifiesta como un proceso químico de dolomitización. Es decir, una descomposición de la dolomita  $\text{CaMgCO}_3$ , y en presencia de hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , proporcionando la formación de calcita  $\text{CaCO}_3$  y de brucita  $\text{Mg(OH)}_2$  minerales estables e insolubles y algunos carbonatos insolubles. Este proceso también produce fisuración en mapa, fatiga y posterior destrucción por desintegración.

#### **IV.5.5.4. Cristalización de sales**

Recibe este nombre la aparición, en las caras externas de los paramentos de unas construcción, o de los materiales de revestimiento, de un polvillo salitroso de color blanquecino, originado por la conversión espontanea de ciertas sales solubles (nitratos, fosfatos y carbonatos).

Las eflorescencias se forman debido a la presencia de ciertas sales solubles que por la acción de la humedad son disueltas y transportadas al exterior, en cuya superficie el agua se evapora y dichas sales se cristalizan para formar un cuerpo pulverulento que por así decirlo mancha la pared, el techo o el pavimento. En definitiva, se trata de una deshidratación parcial o total, caracterizada por la presencia de un cuerpo pulverulento que aflora a las partes externas de los paramentos afectados. Las eflorescencias pueden dar origen a una lesión superficial de los elementos afectados, provocando su erosión. Las piezas enfermas por la acción continua y en aumento de las eflorescencias puede meteorizarse por sus bordes y arruinar el paramento. Al principio el daño es relativamente modesto, pero si el proceso continúa avanzando, la zona erosionada se hace más grande y profunda, termina por producirse la desintegración total de aquellas parte.

Para evitarlo, ésta debe ser objeto de un tratamiento adecuado.

Las eflorescencias que salen de las partes altas de la obra son atribuibles, en principio, a la composición de la masa arcillosa con la que fueron amasadas las propias piezas cerámicas. Los sulfatos se formaron probablemente durante el proceso de cocción de la masa. O tal vez la arcilla portaba ya desde su origen compuestos minerales perjudiciales.

Pero hay otras causas, por ejemplo, la aparición de eflorescencias puede deberse a un exceso de rapidez en la realización de la obra. Cuando el constructor se interesa por abreviar el período de ejecución y entrega, tal deseo puede llevar al aprovechamiento de los días que presentan condiciones meteorológicas adversas. Esto puede ser motivo a que queden ocluidas humedades, que se van acumulando, y a la que se cierre la posibilidad de evacuarse por evaporación. En consecuencia se forman sulfato sódico en el mortero del cemento, el cual cristaliza y se deposita en el exterior de la juntas, afectando al mismo tiempo a los paramentos exteriores e interiores.

Por otra parte, en el supuesto de que las eflorescencias aparezcan en las partes bajas de un muro, lo más probable es que las sales procedan del suelo o del subsuelo, de donde ascienden por capilaridad. El terreno puede contener dichas sales, incluso debidas al abandono de tierras de labor inmediatas o convertidas a terrenos urbanos, siendo el agua de lluvia quien la ha captado y transportado hasta el punto en donde aflorar sobre la superficie, para sufrir la transformación eflorescente.

Las sales minerales que motivan la aparición de eflorescencias son, básicamente, los sulfatos alcalinos, tales como el sulfato de calcio, el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio. Aunque también pueden promoverla algunos nitritos y, con menor frecuencias algunos carbonatos.

Por lo general, su procedencia habrá que buscarla en:

- Los propios materiales, arcillas por ejemplo, que llevan incorporadas dichas sales disueltas.
- El terreno, donde se ha edificado especialmente si es de tipo arcilloso y los cimientos de la edificación están en contacto permanente y sin protección impermeable alguna.
- La proximidad del mar, en contacto directo con el agua o expuesta a los aires salobres marinos.
- El carbonato de calcio de la construcción, que puede ser atacado por los gases de azufre que lleva en disolución el aire contaminado, y que se convertirá en sulfato de calcio, que a su vez actuará como agente agresor.

#### **IV.5.6. ACCIÓN DE LOS CLORUROS EN EL CONCRETO**

La importancia de los cloruros dentro de la masa de concreto estriba en la influencia que estos tienen en el desarrollo del fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo o de cualquier otro metal embebido.

Los cloruros, así como la mayor parte de los agentes químicos agresivos, penetran como contaminación en los componentes del concreto al momento de la dosificación o bien cuando el concreto ha endurecido (absorción). Esto se presenta cuando se expone a un medio ambiente agresivo

El estado en el cual se encuentran los cloruros dentro del concreto pueden ser de dos:



- *Cloruros libres.* Estos se encuentran en el concreto de dos formas, físicamente son absorbidos por las paredes dentro de los poros o químicamente son ligados por reacción con ciertos compuestos del cemento. En el último caso los compuestos formados son el monocloroaluminato hidratado, también conocido como sal de Friedel, cuya fórmula es  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ .
- *Cloruros mezclados.* Estos se encuentran fijados químicamente o físicamente y pueden penetrar muy fácilmente en el interior del concreto por capilaridad, bajo los efectos de la variación de la humedad, consecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado. Se puede considerar también la penetración por difusión sobre el gradiente de concentración a partir de agua de mar. Además, estos cloruros son también susceptibles a penetrar hasta el acero de refuerzo para despasivarlo.

El problema del ataque de cloruros surge comúnmente cuando los iones ingresan desde el exterior. Esto puede ser causado por sales descongelantes, otra fuente importante de iones de cloruro es el agua de mar en contacto con el concreto. Los cloruros también se pueden depositar sobre la superficie de concreto en la forma de gotitas muy finas de agua de mar que lleva el aire (extraídas desde el mar por turbulencias y transportadas por el viento) o de polvo que lleva el aire que subsecuentemente llega a humedecerse con el rocío. Es útil señalar que los cloruros que lleva el aire pueden viajar distancias considerables: se ha informado de dos kilómetros, pero es posible que viajen a distancias todavía mayores, lo cual depende del viento y de la topografía. La configuración de las estructuras también afecta el movimiento de las sales llevadas por el aire: cuando ocurren remolinos las sales pueden alcanzar las superficies de las estructuras más próximas a tierra.

El agua freática salobre en contacto con el concreto es también una fuente de cloruros. Aunque este es un caso raro, se puede mencionar que los cloruros pueden ingresar en el concreto por conflagración de materiales orgánicos que contienen cloruros. El ácido clorhídrico se forma y deposita sobre la superficie del concreto cuando reacciona con iones de calcio en el agua de poros.

Cualquiera que sea su origen externo, los cloruros penetran en el concreto por transporte de agua que los contiene, así como por difusión de los iones en el agua y por absorción. El ingreso prolongado y repetido, con el tiempo, puede generar una alta concentración de iones de cloruro en superficies del concreto reforzado.

Cuando el concreto está sumergido permanentemente, los cloruros ingresan hasta una profundidad considerable pero, al menos que el oxígeno esté presente en el cátodo, no habrá ninguna corrosión.

Lo que sigue es una descripción de una situación que se encuentra a menudo en estructuras sobre la costa en un clima cálido. Como se sabe, el concreto seco embebe agua de mar por absorción y, en ciertas condiciones, puede continuar haciéndolo así hasta llegar a saturarse. Si las condiciones externas cambian luego a secas, la dirección del movimiento del agua llega a invertirse y el agua se evapora desde los extremos de los poros capilares abiertos hacia el aire circundante. Sin embargo, es el agua pura la que se evapora, las sales son dejadas como residuos. Así, la concentración de sales de agua todavía en el concreto aumenta cerca de la superficie de éste. El gradiente de concentración así establecido conduce las sales de agua que está cerca de la superficie del concreto hacia las zonas de concentración más bajas, es decir, hacia adentro; esto se denomina «**transporte por difusión**». Según sea la humedad relativa externa y la duración del período de secado, en todo caso el agua de la zona exterior del concreto tiende a evaporarse, de manera que al agua que permanece en el interior llegará a saturarse con sal y la excedente se precipitará como cristales.

El agua se traslada hacia fuera y la sal hacia adentro. El ciclo siguiente de humedecimiento con agua salada traerá más sal presente en solución dentro de los poros capilares. El gradiente de concentración decrece ahora hacia fuera a partir de un valor pico a cierta profundidad desde la superficie, y algunas sales pueden difundirse hacia la superficie del concreto. Sin embargo, si el período de humedecimiento es corto y el secado se vuelve a reiniciar rápidamente, el ingreso de agua salada llevará las sales a gran profundidad dentro del concreto; el secado posterior eliminará el agua pura, dejando las sales.

La extensión exacta del movimiento de sal depende de la longitud de los períodos de mojado y secado. Se puede mencionar que el mojado del concreto ocurre de forma muy rápida y el secado es más lento; el interior del concreto nunca seca completamente. Habrá que observar que la difusión de los iones durante los períodos húmedos es bastante lenta.

Así, es evidente que un ingreso progresivo de sales hacia el acero de refuerzo ocurre con mojado y secado alternado. El hecho fundamental es que, con el paso del tiempo, una cantidad suficiente de iones de cloruro alcanzará la superficie del acero de refuerzo.

Esta secuencia varía de una localización a otra, y depende el movimiento del mar y del viento, de la exposición al sol, y del uso de la estructura. Así, aún diferentes partes de la misma estructura pueden experimentar un modelo diferente de mojado y secado; esto explica, porque algunas veces, hay una variación considerable en el alcance del daño por corrosión en una sola estructura.

No es sólo el mojado y secado de la zona superficial del concreto lo que influye en el ingreso de los cloruros; el secado hasta una profundidad mayor deja que el mojado subsecuente lleve cloruros muy adentro del concreto, acelerando así el ingreso de iones de cloruro. Por esta razón el concreto en la zona de mareas (donde el período de secado es corto) es menos vulnerable a corrosión que el concreto en la zona de salpicaduras (donde el agua de mar sólo puede ingresar cuando el mar está alto o en viento es fuerte).

La prueba para evaluar el contenido de cloruros dentro del concreto se hace tomando una muestra de concreto de la estructura, ya sea extrayendo concreto pulverizado usando un martillo rotatorio de percusión o usando corazones y luego pulverizando el concreto en el laboratorio. Generalmente las muestras de pulverización en el campo se toman en diferentes lugares del miembro sospechoso y que está bajo investigación. En cada profundidad de muestro, se recoge el material pulverizado y se almacena en un contenedor limpio, el agujero se limpia con una aspiradora, y se lleva a cabo el siguiente muestro a la profundidad deseada. Las muestras pulverizadas se analizan usando un método químico húmedo.

#### **IV.5.7. SUCIEDAD DE LAS FACHADAS**

La suciedad que se forma en la superficie de toda estructura de concreto, debida a múltiples factores, es posiblemente el daño que menos peligro aparente depara a las obras, pero también es más extendido y uno de las más ostensibles.

El agente que principalmente provoca esta suciedad es la polución ambiental. La atmósfera contaminada por infinidad de partículas en suspensión, tales como grasas, polvo, polen, residuos de la combustión procedentes de los vehículos, de las calefacciones, de las fábricas, etc., y que se depositan sobre las superficies, son la causa primordial de esta degradación lenta, pero incontenible, sobre las construcciones.

A ellos debe añadirse la agresividad química que ofrecen las condiciones ambientales en las zonas industriales, que provocan la corrosión de las superficies de las piedras naturales y artificiales, conocida con el nombre de «lluvia ácida».



La suciedad se caracteriza por la presencia de una coloración más o menos intensa de tonos oscuros e indefinidos comprendidos en una escala de grises parduzcos a verdinegros. Se aprecia por un manchado desigual y discontinuo en las construcciones modernas; En las antiguas suele manifestarse con una solución más uniforme y generalizada, por lo que aparentemente su intensidad es menor. La capacidad superficial que se forma está compuesta por una mezcla muy heterogénea en la que predomina el hollín graso y el polvo, y que al tacto, la textura es untuosa.



Foto IV.4. Suciedad en fachada de edificio debido a equipos de aire acondicionado que originalmente no estaban proyectados.

#### IV.6.ACCIONES BIOLÓGICAS

La presencia de organismos y microorganismos de origen vegetal o animal sobre las estructuras de concreto, no solamente pueden afectar el confort ambiental y la estética de las construcciones, sino que también puede producir una gran variedad de daños y defectos de carácter físico, mecánico, químico o biológico.

Lo anterior, permite identificar cuatro tipos de procesos de degradación ambiental; biofísico, biomecánico, bioquímico y biológico propiamente dicho. Los dos primeros afectan principalmente la permeabilidad, la resistencia y la rigidez del concreto; mientras que los dos restantes, provocan la transformación de los compuestos del cemento endurecido y/o los agregados del concreto.

El deterioro de origen biológico debe ser identificado, estudiado prevenido y tratado, con la misma importancia que cualquiera de los otros mecanismos de daño que se han estudiado hasta el momento. Sin embargo, la patología del concreto tiende a asociar este tipo de deterioro más con la acción de los microorganismos que de los organismos. Por ello, se definirán algunos conceptos básicos como biorreactividad, biocapa, biodeterioro y biocorrosión. Se clasificarán los microorganismos según su origen; y finalmente, se hará referencia a los diferentes tipos de ataque biológico, mecanismos de acción, ciclos de azufre, biocorrosión de materiales metálicos y biodegradación de hidrocarburos.



Foto IV.5. La humedad de condensación en un cuarto de baño mal ventilado ha favorecido el crecimiento de microorganismos y manchas en la superficie.

### IV.6.1. CONCEPTO DE LA BIORREACTIVIDAD

La biorreactividad del concreto, como la de cualquier otro material, hace referencia al estudio de todas aquellas propiedades del concreto que constituyen o favorecen la colonización, establecimiento y desarrollo de organismos de origen animal o de origen vegetal, y que afectan su durabilidad como material de construcción. Pero además, para que la biorreactividad del concreto funcione, se requieren cuatro condiciones; presencia de agua, disponibilidad de nutrientes, condiciones ambientales apropiadas y superficie de colonización.

#### IV.6.1.1. Presencia de agua

Todas las formas de vida conocidas en la tierra, necesitan de agua para crecer y reproducirse. De manera que, para que haya deterioro biológico se requiere agua, y esta puede proceder de fuentes externas (humedad del medio ambiente) o estar presente en los poros del concreto (humedad relativa efectiva).

#### IV.6.1.2. Disponibilidad de nutrientes

De igual modo que con el agua, los microorganismos forman colonias donde hay fuentes disponibles de nutrientes. El medio ambiente puede ser una fuente, las sustancias que se depositan o impregnan la superficie del concreto pueden ser otra fuente y el mismo concreto puede constituirse también como una fuente de alimentación.

El medio ambiente contiene muchos gases y partículas que pueden servir como alimento de diferentes microorganismos. Por ejemplos, las bacterias autotróficas se alimentan del  $\text{CO}_2$  atmosférico. También, muchos contaminantes del aire o del suelo, como los hidrocarburos de aceite lubricantes y gasolina, pueden ser utilizados como alimento de microorganismos.

Entre las sustancias depositadas o impregnadas, la materia orgánica siempre ha sido fuente de alimento para las bacterias heterótrofas y los hongos. De igual manera, la descomposición de un cierto y determinado organismo puede ser fuente de alimento para el crecimiento posterior de otros organismos distintos.

Para ciertos microorganismos, la cal y algunos minerales que contiene el concreto, también pueden constituir fuente nutritiva.



#### IV.6.1.3. Condiciones ambientales

Aunque el microclima que rodea la superficie del concreto, es determinante para el desarrollo de microorganismos, hay ciertos géneros que pueden sobrevivir por largos períodos de tiempo en condiciones muy adversas. Por ejemplo, la presencia de oxígeno no siempre es necesaria, pues las bacterias anaeróbicas viven con concentraciones de oxígeno inferiores a 0.1 mg/l; mientras que las aeróbicas lo hacen con concentraciones de oxígeno superiores a 1 mg/l.

Los valores de pH próximos a 7 (neutro) y un intervalo de temperatura entre 20 y 35°C, favorecen sustancialmente la multiplicación, crecimiento y desarrollo de colonias de microorganismos. Pero, los microorganismos, también pueden cambiar el microclima alterando el pH, la concentración de oxígeno, favoreciendo la acumulación y mantenimiento de cierto nivel de humedad y desarrollando y manteniendo cierto nivel de temperatura, entre otras, con el objeto de posibilitar el desarrollo de otros microorganismos y trayendo como consecuencia ciclos de colonización y deterioro.

#### IV.6.1.4. Superficies de colonización

Para que se establezcan los asentamientos y colonias de microorganismos sobre las superficies del concreto, deben establecerse unos mecanismos de fijación, y ellos se dan en virtud de la textura que ofrece la superficie de anclaje. Usualmente, las texturas rugosas y porosas, ofrecen mejores condiciones para el asentamiento porque favorecen la retención de agua y el crecimiento del microorganismo invasor; aunque, algunas superficies lisas y densas también pueden servir como superficie de invasión.

En general, se ha demostrado que el mortero es más biorreactivo que el concreto.

Por otra parte, las estructuras que se encuentran relacionadas con la industria de la alimentación, sistemas de tratamiento de aguas residuales, procesamiento de materiales de origen orgánico, transporte de hidrocarburos, etc., son estructuras que favorecen la presencia de agua, nutrientes y posiblemente temperaturas confortables para la proliferación de microorganismos.

### IV.6.2. DEFINICIÓN DE BIOCAPA

La capa biológica o biocapa se puede definir como la película o costra que se forma sobre la superficie de concreto y mortero, como consecuencia del asentamiento y presencia de microorganismos con actividad metabólica; cuyo ciclo de vida, también favorece la formación y espesor de la biocapa (por excreción de sustancias como polisacáridos y productos ácidos) y por la descomposición de microorganismos muertos.

La biocapa se caracteriza por ser una masa de consistencia gelatinosa de coloración variada (machas de diversas patinas de color verde, marrón o negro) según la presencia o ausencia de oxígeno.

#### IV.6.2.1. Formación de la biocapa

De acuerdo con varios autores, la biocapa sobre concretos o morteros puede formarse desarrollando la siguiente secuencia:

- Fijación de los microorganismos en la superficie del material húmedo y su probable interacción con las moléculas orgánicas previamente adheridas a la superficie.
- Absorción de agua y nutrientes, con rápida reproducción de los microorganismos.

- Excreción de productos que alteran químicamente el entorno.
- Muerte y descomposición de microorganismos que sirven como alimento o como masa de relleno de la biocapa.
- Como resultado de la alteración del entorno y descomposición de los microorganismos muertos, se pueden desarrollar nuevas y diferentes especies y géneros que poseen distintas necesidades de oxígeno y abultan la biocapa.
- Adicionalmente, por la presencia de humedad, se pueden atrapar partículas de polvo, polen, esporas, partículas de carbón u otras, procedentes del medio ambiente, que pueden servir como nutrientes o como ingredientes adicionales del cultivo para engrosar la biocapa. A veces, lo anterior da lugar a una costra de patina dura, difícil de remover.

En ocasiones, la biocapa puede llegar a tener un espesor significativo de tierra acumulada (humos), favoreciendo la retención de agua y nutrientes que pueden permitir el crecimiento de organismos más grandes como vegetación.

### **IV.6.3. MECANISMOS DE DETERIORO BIOLÓGICO**

Entre los mecanismos de deterioro biológico del concreto, están el biodeterioro del concreto, la biodegradación de hidrocarburos y la biocorrosión de los metales.

#### **IV.6.3.1. Biodeterioro del concreto**

El deterioro microbiológico o biodeterioro del concreto, consiste en el ataque de microorganismos que causan disolución de los componentes cementantes o de los agregados del concreto, como consecuencia de la acción de sus metabolismos ácidos.

El biodeterioro puede ocurrir a través de la asimilación de los compuestos minerales del concreto o por la excreción de productos agresivos, durante su reproducción, tales como ácidos inorgánicos (por ejemplo, ácido sulfúrico) o ácidos orgánicos (por ejemplo, ácido acético, cítrico, oxálico o húmico, entre otros).

#### **IV.6.3.2. Biodegradación de hidrocarburos**

La fuga de hidrocarburos derivados del petróleo (compuestos orgánicos formados solamente por hidrógeno y carbono) y su infiltración en sistemas acuíferos es un problema que sucede con alguna frecuencia. Cuando un hidrocarburo entra en contacto con el agua, este se disuelve parcialmente y lo contamina. Los contaminantes más habituales son; benceno, etil benceno y xileno.

La mayoría de acuíferos contienen microorganismos con capacidad metabólica para oxidar hidrocarburos y por su acción, los hidrocarburos se pueden degradar en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La biodegradación de algunos hidrocarburos, por la acción de ciertos microorganismos aeróbicos, es consecuencia de una reacción de oxireducción, en la cual se produce bióxido de carbono, metano, sales orgánicas, hierro reducido y agua. En una biodegradación anaeróbica de benceno y tolueno, principalmente se pueden producir altas concentraciones de ácidos orgánicos (sobre todo ácido acético).

Si los hidrocarburos y los productos de su degradación entran en contacto con el concreto, pueden ocurrir agresiones significativas de carácter químico y/o biológico.



#### IV.6.3.3. Biocorrosión de los metales

La corrosión microbiológica o biocorrosión se aplica a los metales cuando existe evidencia de fenómenos de naturales electroquímica, que están relacionados con la presencia y participación de microorganismos locales.

En estos casos se ha identificado el  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico) de origen biológico, como principal agente de la biocorrosión del acero de refuerzo y de algunos fenómenos de biodegradación del concreto.

#### IV.6.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS Y SU ACCIÓN SOBRE EL CONCRETO

Entre los microorganismos que fomentan el deterioro microbiológico del concreto, se pueden distinguir géneros y especies principalmente de origen vegetal. Entre ellas se encuentran las bacterias, los hongos, las algas, los líquenes y el musgo.

##### IV.6.4.1. Bacterias

En general, las bacterias son microorganismos cuyo tamaño es del orden de una micra o menos y están constituidos por una sola célula rudimentaria. Algunas son patógenas para los seres vivos del reino animal y otras no. Según su forma se distinguen en cocos, bacilos, vidrios y espirilos. Además, pueden ser aeróbicas (si utilizan el oxígeno para sus procesos vitales) o anaeróbicas (si necesitan un ambiente carente de oxígeno). Como bacterias dañinas para el concreto, en virtud de los procesos químicos que se derivan de su metabolismo, se distinguen las siguientes:

- *Bacterias heterotróficas*. Son bacterias que necesitan compuestos de carbono más complejos que el  $CO_2$  atmosférico para su metabolismo y usualmente el producto de su metabolismo son ácidos orgánicos. Entre ellas, se encuentran las sulfobacterias y las nitrobacterias. Las primeras son bacterias que oxidan el azufre a sulfato, el cual al combinarse con la pasta de cemento de un concreto, forman el sulfato de calcio, con el consecuente daño por ataque de sulfatos. Las segundas (nitrobacterias), son bacterias que transforman el amoníaco presente en la atmósfera en nitritos y nitratos que se combinan con la pasta de cemento para formar nitrato de calcio, con el consecuente ataque de sales.
- *Bacterias sulfo-oxidantes*. Algunas bacterias (tiobacterias) producen oxidación de uno o más compuestos reducidos del azufre (incluyendo sulfuro, azufre elemental, tiosulfato, politionato) y dan lugar a la formación de sulfatos. Estas por necesitar oxígeno (bacterias aeróbicas) para sus procesos vitales, causan oxidación del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), transformando en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), aunque también producen ácido acético, sulfatos, azufre, sulfitos y politionatos. La temperatura óptima para su crecimiento está en el rango de 20 a 43°C, con pH que puede variar entre 2.0 (thiobacillus thiooxydans) y 8.0 (thiobacillus thioparus). Una de las bacterias más eficientes de la oxidación del azufre, es el thiobacillus thiooxydans que resiste ambientes extremos ácidos.
- *Bacterias sulfo-reductoras*. Son bacterias que reducen los sulfatos existentes en las aguas y los transforman en sulfatos de hidrógeno y gas sulfhídrico, que causan biocorrosión del acero del refuerzo. Estas son bacterias anaeróbicas. La temperatura óptima para su crecimiento está en el rango de 25 a 44°C, con pH que puede variar entre 5.5 y 9.0, siendo el óptimo un pH casi neutro de 7.2.

#### **IV.6.4.2. Hongos**

Entre los microorganismos vegetales, se encuentra en primera instancia los hongos de superficie, que son capaces de crecer en condiciones anaeróbicas y con cantidades de agua inferiores a la necesaria para el crecimiento de bacterias. Sin embargo, pueden sobrevivir en agua o en tierra, siempre y cuando exista presencia de materia orgánica.

La mayor parte del material biológico que se encuentra en suspensión en la atmósfera son esporas de hongos. Las especies que se encuentran en el aire y su concentración, dependen de la temperatura, el régimen de lluvias, los vientos dominantes, la estacionalidad del clima y las variaciones de claridad y oscuridad. Los hongos que se encuentran en el suelo, usualmente se desarrollan mejor en ambientes húmedos y abarcan especies de los géneros *aspergillus* y *penicillium*. De acuerdo con la clasificación taxonómica, los hongos de superficie pertenecen a la categoría «fungi», dentro de los cuales los más comunes son los hongos simples, los mohos, los fermentos y las levaduras.

Se estima que hay aproximadamente 80,000 especies diferentes de hongos y por ello su forma y tamaño pueden ser muy variados. Por lo tanto, los hongos encontrados en determinados ambientes pueden ser muy diferentes en tipo y número de aquellos encontrados en otros ambientes. Los hongos, son de los organismos que más rápidamente proliferan y algunos de ellos producen hasta cinco diferentes tipos de esporas.

En general, los hongos son vegetales inferiores, cuyo cuerpo (talo) puede ser unicelular o estar formado por filamentos microscópicos llamados hifas, que absorben los nutrientes y además se entrelazan para forman un entramado llamado micelio. Son organismos carentes de clorofila y por lo tanto heterótrofos (no sintetizan sus propios nutrientes), obligados a vivir sobre materias orgánicas en descomposición, como parásitos a expensas de organismos vivos o en simbiosis con algas.

En cuanto a nutrientes orgánicos, los hongos requieren fósforo, nitrógeno, cloro, magnesio y calcio; y además pueden utilizar como fuente de carbono los aceites diesel o los hidrocarburos volátiles. Con relación a la temperatura de supervivencia, el intervalo más adecuado varía entre 25 y 30°C. Sin embargo, hay hongos que pueden vivir a bajas temperaturas y también a altas temperaturas.

Un aspecto importante de los hongos de superficie, es que durante su crecimiento pueden causar daños mecánicos por la acción de hifas que penetran en la estructura del concreto y alteraciones químicas debidas al desprendimiento de ácidos orgánicos e inorgánicos y otras sustancias químicas que producen. Las características más evidentes y notorias de su presencia en una superficie de concreto son:

- La formación de manchas de coloración micromorfológica diferente (verdes rosáceos y cenizas oscuras).
- El desagradable olor a moho que impregna el medio ambiente.

#### **IV.6.4.3. Algas, líquenes y musgos**

Las algas son plantas celulares acuáticas, con tallo de figura de cintas, filamentos o ramificaciones, sostenidos por una base común. Los líquenes son organismos vegetales que resultan de la simbiosis de una alga y un hongo. El hongo cede el agua al alga y sustancias minerales y toma de esta las sustancias orgánicas. El musgo es una planta briofita, con hojas provistas de pelos rizoides, de textura blanda, de forma no muy definida y altura



limitada, que crece en lugares sombríos sobre la corteza de los árboles, las piedras y materiales de construcción como el concreto.

Las algas, los líquenes y el musgo, generalmente se asocian a ecosistemas acuáticos, pero también se encuentran en medios terrestres, donde el agua se retiene o la evaporación se atenúa por estar al abrigo del viento o luz solar. Por lo tanto, la humedad del sustrato de invasión es crucial para la colonización. Su crecimiento no es uniforme y frecuentemente forman manchas en las superficies donde se desarrollan.

Las algas usualmente captan calcio y magnesio de la pasta de cemento y los incorporan al ciclo de su metabolismo; esto causa la formación de pequeñas cavidades o perforaciones sobre la superficie colonizada.

El crecimiento de líquenes se fundamenta en la simbiosis descrita entre algas y hongos, y esta unión permite a las dos partes vivir en los medios más inhóspitos (regiones polares, andinas, desérticas, etc.), haciéndolas resistentes a la desecación y a temperaturas extremas, desarrollando larga vida con baja tasa de crecimiento, y siendo muy eficiente en la acumulación de nutrientes de su ambiente. Sin embargo, muy pocos líquenes se encuentran en las áreas urbanas, ya que son muy sensibles a la contaminación atmosférica, en particular al bióxido de sulfuro. Las superficies de concreto y mortero colonizados por líquenes, usualmente se encuentran fuertemente alteradas, mostrando abundantes perforaciones (microperforaciones con diámetro de 0.5 a 10 micras; y mesoperforaciones con diámetros visibles de 0.1 a 0.5 mm), evidentes después de la muerte y desaparición del talo líquénico. Hay casos en los cuales las hifas del talo, se han encontrado a profundidades de 5 mm o más, sobre todo en fisuras y planos de falla con más de 10 mm de profundidad.

El musgo, a diferencia de los anteriores, obtiene el agua y los nutrientes a partir de la atmósfera saturada, ya que carece de raíces verdaderas, pues los rizoides son apéndices que ayudan a fijar la planta, pero que no absorben agua ni nutrientes del sustrato de anclaje. Estos también son sensibles al bióxido de sulfuro de la atmósfera. En algunos casos, se ha constatado que los rizoides penetran en el concreto o en el mortero hasta 10 mm y ocasionan una abundante red de filamentos distribuida en el interior de la masa, causando fisuras y grietas, facilitando el acceso de agua y sustancias agresivas. Además, el ciclo de vida del musgo favorece la presencia de materia orgánica en el sustrato, lo cual a su vez fomenta el desarrollo de microorganismos heterótrofos (bacterias), produciendo humos para el posterior crecimiento de plantas vasculares.

## IV.7.FALLOS EN LOS ACABADOS

### IV.7.1. REVESTIMIENTOS DE LOS PARAMENTOS

Los revestimientos de mortero sobre los paramentos, cualquiera que sea su composición, constituyen uno de los elementos más débiles de la construcción, por lo que están sometidos con mayor frecuencia a la degradación ambiental. Pero al no formar parte de la propia estructura constructiva, sus lesiones suelen carecer de auténtica gravedad, aun siendo aparatosos, y pueden repararse con relativa facilidad.

No obstante teniendo en cuenta que la misión de protección de la obra de la fábrica que se asignan a estos acabados, los daños en los repellados acaban por afectar el estado de los propios ladrillos, por lo que aun aceptando la levedad de las lesiones en sus principios, procede a su reparación inmediata para evitar males mayores.

#### IV.7.1.1. Defectos más frecuentes

Gran parte de los fallos que ofrecen los revestimientos a base de mortero, y que suelen presentarse al cabo de un cierto tiempo de haberse tendido, suelen deberse tanto a una deficiente aplicación, como a causas que provienen de los propios materiales empleados. El medio ambiente, sobre todo las humedades originadas por la lluvia, agravan el grado de la lesión, pero en la mayoría de las ocasiones no tendrían la ocasión de dañar el revestimiento si no existiera una predisposición previa del mismo a la formación de lesiones.

Entre ellas, las más importantes son las fisuras, los desmoronamientos superficiales, los desconchados y los agrietamientos.



Foto IV.6. Aplanado de protección desprendido debido a calidad deficiente en su colocación

#### IV.7.1.2. Fisuras por contracción

Se llaman fisuras a las hendiduras finas que se producen en la superficie de un material, en este caso concreto referido exclusivamente a un revestimiento a base de mortero. Generalmente se reproduce por retracción del mortero aplicado al secar. Las causas pueden originarse por haber tendido la capa de la masa encima de un soporte sucio o efecto de humedades que no se corrigieron oportunamente o, también por falta de la compactación debida. Contribuye también a la formación de fisuraciones el empleo de dosificaciones demasiado ricas en cemento portland, así como la desecación excesivamente rápida del aplanado.

Los defectos de retracción que en principio, pudieran carecer de importancia, se van incrementando con el paso del tiempo y dan lugar a que las primitivas fisuras evolucionen, en el sentido de hacerse más grandes, numerosas y profundas, pudiendo convertirse en grietas. Todo ello provoca el desprendimiento de la capa de revestimiento enferma y la creación de un desconchado, a la cual han contribuido las infiltraciones internas.



Sin embargo, la fisuración acostumbra a ser superficial, no ahondando demasiado en la capa del revestimiento; a lo sumo puede llegar hasta el soporte, al que no suele afectar. Es, por lo tanto, un defecto de orden menor, que no ofrece gran peligro en sus orígenes, pero que al destruir el revestimiento protector de la obra de fábrica, deja a ésta en contacto directo con las acciones agresivas de los agentes climatológicos.

#### IV.7.1.3. Fisuración progresiva.

Se considera que una fisuración es progresiva cuando se hace ostensible el avance de la enfermedad por el aumento de la superficie afectada. A medida que transcurre el tiempo, las fisuras superficiales se alargan y se ramifican. Y el final suele ser el mismo; la capa enferma del revestimiento se desprende del soporte y no tarda en caer. Pero el motivo acostumbra a ser distinto. Básicamente se debe a la formación y cristalización de sales que provienen de determinados tipos de ladrillo, o bien el propio mortero utilizado para aplicar el revestimiento, cuya acción química incide sobre el poder de adherencia de aquél, destruyendo su cohesión.

#### IV.7.1.4. Friabilidad de la capa exterior del revestimiento

La friabilidad o calidad de fiable de un mortero, es la predisposición que muestra éste a disgregarse superficialmente, por descomposición de los componentes que tienden a desmenuzarse.

El origen de este tipo de lesión debe buscarse en la falta de resistencia y de dureza de algunos morteros, motivada generalmente por la mala adherencia al soporte. En ocasiones se produce el mismo efecto por la pérdida exagerada del poder resistente que experimenta el material aglomerado, a causa de su excesiva exposición a los lavados de lluvia. Actúan igualmente, como agente de la descomposición, las condiciones contaminantes del aire, capaces de provocar reacciones químicas desfavorables para la capa exterior del revestimiento.



Foto IV.7. Manchas, deterioro y pérdida de material debido a la humedad

#### IV.7.1.5. Desconchados

Cuando sobreviene el desprendimiento de una parte del revestimiento, se dice que se ha producido un «desconchado». El nombre se aplica indistintamente tanto a la parte desprendida como al hueco que deja en el paramento. Un desconchado se produce siempre por un fallo en la adherencia del material, que se desgaja del soporte.



Foto IV.8. La aparición de humedades ha provocado la pérdida del aplanado y el deterioro de la pintura

Los motivos de esta lesión, aunque pueden ser muy variados, provienen fundamentalmente de causas muy similares:

- Mala calidad de los materiales que componen la mezcla, o una dosificación incorrecta de las mismas.
- Defectos del soporte. Por ejemplo, tener su estructura dañada y aplicar el revestimiento encima sin limpiar ni preparar adecuadamente la zona afectada, o bien, que se trate de un soporte de poca porosidad (defecto bastante frecuente), con escaso poder de adherencia, lo que no permite una perfecta fijación del revestimiento.
- Presencia de humedades internas que afectan al soporte, favorecidas por una acción continua o intensa del agua de lluvia.
- Fallos en la ejecución del revestimiento, aplicado de prisa o poco minuciosamente, lo que perjudicaría no sólo la adherencia de la masa, que será defectuosa, sino también principalmente, a la resistencia que oponga a los impactos.

En el supuesto de que la parte del revestimiento afectada por la lesión, aún estando separada casi totalmente del soporte, se mantenga unida a él, por uno o varios puntos, el daño se conocerá con el nombre de «descuelgue». El desconche propiamente dicho se produce en el mismo momento en que la parte dañada se desprende por completo y cae al suelo, por lo que también se denomina desprendimiento. De hecho, un desconchado suele tener su origen inmediato en un descuelgue.

#### IV.7.1.6. Progresión degenerativa de un desconchado

Si no se ataja el daño oportunamente procediendo a su inmediata reparación, los desconchados tienden a incrementar su tamaño, extendiéndose por los bordes hacia el resto del revestimiento. Las zonas desconchadas quedan desprotegidas, los bordes se van desmoronando, penetrando por ellos el agua de lluvia, que valiéndose de los poros, fisuras y grietas que encuentren penetran en el interior, abriéndose paso en la zona de contacto entre el soporte y la capa del revestimiento, cuya adherencia destruye. Las humedades que se forman actúan más o menos lenta, pero continua, lo que arruina poco a poco la propia estructura del soporte.



## IV.7.2. FALLAS EN LA PINTURA

Muchas de las pinturas sufren diversas alteraciones que afectan a la película formada y que suponen otros tantos defectos. Estos pueden tener su origen en la mala calidad del material empleado, en la deficiente preparación del soporte o en la naturaleza del mismo, en las incompatibilidades que pudieran existir entre los componentes del mortero y los del producto aplicado como acabado. Incluso puede ocurrir que el fallo se deba a que la última mano de pintura haya sido dada sobre la anterior sin hallarse ésta completamente seca.

En ocasiones, las causas de una lesión en la capa de pintura o barniz de un soporte, se halla en la presencia de humedades. La excesiva humedad que existe en un paramento es motivo suficiente para un rápido deterioro de la mayoría de las pinturas, sobre todo cuando esta humedad se presenta por la parte interna de la película, aquella que se halla en contacto directo con el soporte.

### IV.7.2.1. Exfoliaciones

Uno de los defectos más corrientes, consecuencia de la mala aplicación de las pinturas, es el de la exfoliación que a su vez degenera en desconchados. La formación de cuarteamientos en la capa de película favorece, asimismo, la presencia de desconchados, fenómenos ambos que van dejando poco a poco el soporte al descubierto por falta de adherencia de la capa de pintura. Esta se rompe en pedazos irregulares y relativamente menudos, cuyos bordes se abarquillan arrastrando el resto de la pieza, que se desprende con facilidad del soporte y termina cayendo.

Se trata de un fallo característico de aquellas pinturas de tipo rígido, tales como pinturas a la cal o al cemento, temple, emulsiones, preparados a base de resinas sintéticas, etc. En todas ellas, la película que se forma al secar el producto toma la dureza de un esmalte, pero no su flexibilidad.

Al secar y retraerse la capa de pintura, en el supuesto de que la superficie de agarre presente determinadas condiciones adversas para asegurar una perfecta adherencia, la película mostrará en seguida su deficiente fijación al soporte, por su tendencia al agrietamiento y a sufrir desconchados.



Foto IV.9. Exfoliación de debido a fallos en su aplicación.

La creación de un desconchado se anuncia, generalmente por la aparición de una cuarteadura. El cuarteamiento de la pintura de acabado de un paramento suele anunciar la inminencia de un desconchado. Al cabo de relativamente poco tiempo comienzan a producirse los desprendimientos fragmentados de partes de la pintura, lesión que en su primera fase sólo afecta a la capa superficial que forma el propio recubrimiento.

El recubrimiento de mortero queda entonces al descubierto y desprotegido, y partir de este momento recibirá directamente la lluvia y las agresiones de los agentes ambientales, lo que determinará a su vez se vaya deteriorando.

#### **IV.7.2.2. Defectos de adherencia**

Los defectos de adherencia, que como acabamos de exponer tienen un importantísimo tanto por ciento de culpas en la formación de desconchados, son imputables de diversas causas, pero en la mayoría de las ocasiones existe una motivación de incompatibilidad entre el soporte y la pintura. Principalmente, basados en dos fallos:

- La aplicación de la pintura se hace sobre un fondo viejo, ya pintado, sin la suficiente preparación del soporte, incluso sin haberle sometido a una elemental operación de limpieza, y mal imprimado. La pintura no lo tapa todo y cuando tapa lo que no debiera, la parte tapada repele la capa de pintura.
- La pintura elegida no es la adecuada.

Por ejemplo, son frecuentes las exfoliaciones, que no tardan en convertirse en desconchados de espectacular importancia, que aparecen en las zonas pintadas cercanas al suelo, en donde por falta de un aislamiento horizontal puede ascender el agua por capilaridad hasta aproximadamente medio metro. Esta parte de una construcción debe ser protegida de las humedades, aunque solo sea título de precaución, con una buena imprimación hidrófuga, cuya misión consistirá tanto en evitar la acción de las humedades como en reforzar el poder de agarre del soporte tratado.

Una insuficiente impermeabilidad en la pintura utilizada sobre un soporte no tratado expresamente para su hidrofugación, se denunciará con la mala adherencia de la película, la cual se desprenderá con cierta facilidad del soporte y motivará la aparición de grandes desconchados. Lamentablemente existe la tendencia a pintar paramentos de obra de fábrica levantada con ladrillos sílico-calcáreos, aplicando productos supuestamente protectores contra la humedad, pero cuya acción protectora es insuficiente y de corta duración, por lo que se produce un deterioro prematuro del recubrimiento. Aunque se dice que, en estos casos, el soporte repele la pintura, no se trata propiamente de un fenómeno de repelencia, sino de destrucción del poder de adherencia de la película a causa de la humedad que ha conseguido penetrar en la zona de unión de la pintura con la superficie del material pintado.

La incompatibilidad entre los materiales del recubrimiento y el que compone el soporte es otra de las causas que anulan o disminuyen el poder de adherencia. Pero este fallo se suele dar, mayoritariamente, como consecuencia del vicio que tienen algunos profesionales de pintar encima de una capa de pintura, cuya película no ha sido eliminada previamente, limitando la preparación a limpiar y desengrasar la superficie del soporte. Con independencia de que esta superficie pueda hallarse limpia, desengrasada y exenta de polvo, hay que tener en cuenta que algunas pinturas, una vez secas, no aceptan la superposición de otra capa de material distinto. Así, por ejemplo, los esmaltes naturales y sintéticos son incompatibles con las pinturas al agua y al aceite, al igual que ocurre con las emulsiones gliceroftálicas. Las pinturas virílicas, conocidas como pinturas al látex, manifiestan las mismas



incompatibilidades con las pinturas esmaltadas. Las pinturas asfálticas solo son aceptadas por las bituminosas y viceversa.

#### IV.7.2.3. Ampollas

La aparición de ampollas en una película de pintura equivale a un hinchamiento parcial de la misma, que se produce en varios puntos y con diferentes tamaños. En un principio la alteración de la planicidad normal del recubrimiento de pintura no afecta para nada su resistencia, mientras no llegue a romperse.

Por lo general, las ampollas solo se forman en pinturas de cierta calidad, resistentes y flexibles, aplicadas sobre un soporte no preparado adecuadamente. Por ejemplo, lo más probable es que su aparición provenga de la existencia de humedades internas que afloran a la superficie del paramento en donde no pueden evaporarse y quedan atrapadas al encontrar el obstáculo de la capa elástica de pintura, sobre la que presionan y dan lugar a la formación de ampollas. Es lógico que en el supuesto de haber tratado previamente el soporte para eliminar dichas humedades, las ampollas no se producirían.

Tratándose de paramentos expuestos a una fuerte insolación, la elevación de la temperatura superficial provocará una evaporación que no tiene salida. Si la película procediese de una pintura de baja calidad, lo más probable es que la capa cediese y se rompiera por los puntos atacados. Al encontrar una barrera resistente e impermeable, pero al mismo tiempo elástica, las ampollas crecen y terminan por abrirse, al reventar. En un paramento que presente este defecto, es suficiente el roce de la mano ejerciendo una pequeña presión para provocar dicha rotura.



Foto IV.10. Ampollas y cuarteamiento de la pintura aplicada al paramento.

#### IV.7.2.4. Manchas

Por la misma acción combinada de las humedades internas y el soleamiento de la fachada, en el caso de que para el acabado se haya empleado una pintura de dispersión acuosa, en lugar de ampollas suelen aparecer manchas superficiales que oscurecen la pared formando rodales más o menos grandes, según la importancia de la lesión. Con el paso del tiempo, las manchas evolucionan y dan paso a un fisurado cuyas hendiduras se abren formando una especie de cerdillas de forma irregular. El proceso acaba con el desprendimiento de los trozos de la película dañada, formándose desconchados.

#### **IV.7.2.5. Hendiduras**

Las hendiduras en una película de pintura pueden calificarse como una serie de resquebrajaduras en forma de red, que interrumpen la continuidad del recubrimiento. Por dicho motivo, es posible afirmar que éste último pierde por completo sus características protectoras, al permitir que por ellas penetre el agua de lluvia. El fisurado de hendiduras finas y superficiales que sólo afecta a la delgada capa de pintura, se denomina «cuarteado» (que veremos más adelante) para distinguirlo de los llamados agrietamientos y fisuraciones.

Estamos refiriéndonos a defecto que, por desgracia, debe considerarse como habitual, pero que tienen causas bien conocidas y evitables. Por otra parte, es privativo de aquellas películas de pintura que no reúnen condiciones de elasticidad, como sucede, por ejemplo, con todas las pinturas al agua, los silicatos alcalinos, los compuestos resinosos carentes de aceite, etc.

Por lo general, el cuarteado se origina por el hecho de que la mano de pintura de acabado fue aplicada encima de otra de secado más lento, sin esperar a que hubiese secado por completo. La capa superior, al secar, no encuentra el anclaje debido en la capa inferior, que todavía presenta un cierto grado de viscosidad. En consecuencia, se contrae y, por falta de apoyo se fragmenta.

#### **IV.7.3. CONCLUSIÓN**

Los mecanismos que generan un síntoma patológico en una construcción de concreto son muchísimos. Sin embargo, muchos de estos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, que son: acciones mecánicas, acciones físicas, acciones químicas y acciones biológicas. Esta clasificación no engloba los errores que se dan durante las fases de concepción, proyecto y ejecución, los cuales prácticamente pueden ser innumerables, por tal motivo no existe una clasificación de éstos.

En general, el origen de los mecanismos de enfermedades en una construcción, se debe a las condiciones a las que está expuesta la construcción y al medio ambiente que le rodea. Sin embargo, en otras ocasiones el mecanismo de deterioro se ve acelerado por una mala calidad de los materiales usados y falta de supervisión, aunado a una pobre elaboración de los diversos elementos que forman la construcción.

El conocer los agentes que intervienen en el mecanismo que genera el síntoma patológico, es fundamental, ya que de esta forma podremos atacar el origen y suprimirlo. El conocer el mecanismo que origina un síntoma en una construcción de concreto nos ayudará a predecir con cierta exactitud si dicha enfermedad puede progresar en el transcurso del tiempo para degenerarse en una verdadera enfermedad que puede ocasionar una amputación a la construcción e incluso la demolición misma.



# CAPÍTULO V

## EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

### V.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo precedente se han estudiado los mecanismos de daño más frecuentes que se dan en las estructuras de concreto: acciones mecánicas, físicas, químicas y biológicas; y como consecuencia de estas acciones se mencionó que los defectos y daños que puede exhibir una estructura de concreto, también pueden obedecer a uno o varios de los siguientes factores: concepción y diseño del proyecto, materiales, proceso de construcción, operación (uso, abuso o cambio de uso) y/o mantenimiento.

En la actualidad vemos que dichas construcciones inicialmente proyectadas para un período de vida útil o de servicio, éste está siendo drásticamente acortado por la acción del medio o la degradación que se genera en el concreto.

Para poder identificar y caracterizar los defectos y/o daños (tipo y magnitud); así como delimitar su localización y cantidad en una estructura, debe entonces acudir a la patología de la construcción. Esta disciplina, de manera sistemática y ordenada, permite desarrollar una serie de pasos secuenciales (ya esquematizados en la figura II.1), para llevar a cabo una investigación que permita elaborar un diagnóstico (con sus causas), de modo que éste a su vez permita emitir un pronóstico del comportamiento de la estructura, bajo las condiciones de servicio esperadas hacia el futuro. Con base en las recomendaciones del ACI 364 y del Manual de Reparaciones de Concreto del ICRI (Internacional Concrete Repair Institute), se desarrolló el esquema de la figura V.1, en el cual se visualiza que usualmente hay una investigación preliminar profunda o detallada.

La investigación (preliminar y profunda), el diagnóstico de daño y fallas y el pronóstico del comportamiento de una estructura de concreto, son trabajos muchas veces complejos, que obligan a la especialización y demandan la necesidad de trabajos con especialistas de diversos campos de la ingeniería. Desde luego, no sólo requieren elementos técnicos, sino también aspectos de durabilidad, funcionalidad, estética, seguridad y comportamiento en servicio.

El nivel de detalle requerido en un informe de esta naturaleza, puede variar desde la simple valoración de la suficiencia estructural y funcional, basado en la inspección visual durante una investigación preliminar, hasta una profunda investigación y procedimiento de evaluación que combine técnicas especiales de inspección y ensayo. Por ello, es muy importante definir de común acuerdo con el dueño del proyecto o la entidad contratante del estudio, el alcance de los trabajos a realizar, debido a que se pueden generar las diferentes modalidades de informes:

- **Reporte técnico de observaciones.** En este reporte se elabora un documento donde se indican los antecedentes del proyecto y se enumeran las circunstancias observadas en el reconocimiento, así como los resultados de los exámenes efectuados en la visita al sitio del proyecto.
- **Informe de inspección, evaluación y diagnóstico.** Este informe es un documento que se elabora con el objeto de emitir un dictamen y se basa en una inspección (que puede estar acompañada de mediciones, auscultación, y/o exploración), unos ensayos y análisis de los mismos y una evaluación estructural (según necesidades).



Figura V.1. Proceso secuencial de investigación para inspeccionar, evaluar y diagnosticar el comportamiento de una estructura de concreto.

- **Informe de inspección, evaluación, diagnóstico y recomendaciones de rehabilitación.** En este informe incluye lo descrito para un informe de inspección, evaluación y diagnóstico, además de las recomendaciones para su rehabilitación a que haya lugar, en virtud del diagnóstico que se establezca.

Así tenemos que la evaluación de las estructuras de concreto puede ser un proceso reactivo o un proceso proactivo. Generalmente la evaluación tiene lugar como resultado de un signo visible de trastorno, causando preocupación por la estructura y/o durabilidad de un pobre rendimiento funcional, o cambio de las condiciones de servicio que a su vez, da como resultado preocupación por la seguridad.

## V.2. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

De acuerdo con el ACI 364, la investigación preliminar busca acopiar información inicial acerca de las condiciones de una estructura, el tipo y seriedad de los problemas que la afectan, la factibilidad de llevar a cabo una rehabilitación prevista y la información necesaria para una posible investigación detallada.

La investigación preliminar, usualmente es una introducción a la situación que está experimentando la estructura y por lo común conduce a una de las dos situaciones: a) el establecimiento de la necesidad de adelantar estudios adicionales más profundos, detallados y extensos, para poder diagnosticar con certeza los daños y el comportamiento, b) dictaminar la inconveniencia de realizar estudios adicionales, por cuanto el daño es tal que no justifica una restauración económicamente razonable. En general, es recomendable que un estudio preliminar comprenda los siguientes aspectos, dependiendo de la complejidad del proyecto:

### **V.2.1. ANTECEDENTES**

En primera instancia, debe recogerse toda la información general que sea posible, acerca del proyecto. Otro aspecto importante a documentar son las condiciones de exposición de la estructura y la influencia del medio ambiente sobre la misma. Por lo tanto, es muy conveniente obtener la siguiente información:

#### **Información general**

- Nombre.
- Localización geográfica.
- Tipo de estructura (tipo de cimentación, sistema estructural).
- Propietarios y usos (cronológicamente).
- Diseñadores y especificadores del proyecto (por ejemplo, arquitecto, ingeniero de suelos, ingeniero estructural, ingeniero de instalaciones, etc.), constructor, proyectista, proveedores de materiales, etc.
- Historia de la estructura (fechas de diseño, construcción y puesta en servicio, vida útil proyectada, área construida, etc.).

Adicionalmente debe adelantarse entrevistas con personas que hayan conocido la estructura a través del tiempo, para conocer la naturaleza y el tipo de acciones que han actuado (cronología de daños y mantenimiento) y actuación (condiciones de servicio) en el futuro.

#### **Influencia del medio ambiente**

- Humedad relativa (rangos de ocurrencia, frecuencia y duración).
- Temperatura (rangos de ocurrencia, frecuencia, duración, ciclos de congelamiento y deshielo, exposición, solar, etc.).
- Presión (régimen de vientos y lluvias).
- Tipos de agua presente.
- Sustancias agresivas y concentración (tipo, concentración, frecuencia, duración, forma: gas, líquido o sólido).
- Tipos de contacto con agua u otras sustancias (inmersión, escorrentía, salpicadura, vapor, etc.).
- Frecuencia y duración de la exposición.
- Condiciones de exposición particulares o especiales.



## V.2.2. REVISIÓN DEL PROYECTO ORIGINAL

La revisión del proyecto original, se lleva a cabo con el objeto de verificar los planos y las especificaciones con el comportamiento de la estructura, así como confirmar que los planos y las especificaciones estén en concordancia con lo que se encuentra construido. Para la revisión del proyecto original, se hace necesario disponer de los siguientes documentos:

- Estudios de suelos.
- Memorias de cálculo de la estructura.
- Planos estructurales.
- Especificaciones de materiales.
- Planos arquitectónicos.
- Planos de instalaciones.
- Bitácora de obra.

Cuando no se dispone de ellos, se hace necesario recurrir a ensayos no destructivos, a mediciones físicas de la geometría de los elementos, o a la localización del acero de refuerzo (mediante exploración por remoción de recubrimientos o uso de localizaciones de barras), a levantamientos topográficos y altimétricos, etc.

En esta fase del estudio, también es indispensable establecer bajo que versión de la normatividad se hicieron los diseños y las especificaciones, para hacer las comparaciones del caso con la versión vigente. Desde luego, los requerimientos de las cargas de servicio deben ser verificados (cargas estáticas, dinámicas, impactos, vibraciones, etc.), lo mismo que su magnitud, frecuencia y duración.

Si existen diferencias entre lo que está en los planos y especificaciones con lo que está construido, o se evidencian alteraciones en la estructura en servicio, estas situaciones deben registrarse cuidadosamente.

## V.2.3. SELECCIÓN DE RECURSOS PARA LA INSPECCIÓN

En la medida que se vaya cumpliendo la fase de antecedentes, debe identificarse el personal que debe intervenir en la inspección; así como seleccionar los elementos y equipos más apropiados para adelantar la inspección. Entre los equipos más útiles se cuentan los siguientes:

- Anteojos y/o binoculares.
- Lupa.
- Cámara fotográfica y/o vídeo.
- Nivel de mano.
- Grabadora.
- Cinta métrica o distanciómetro.
- Comprobador de fisuras.
- Equipo de topografía y/o nivelación.
- Equipos de auscultación y exploración.

- Frascos y bolsas con cierre hermético.
- Escalera, andamio, etc.
- Elementos de seguridad y protección.

#### **V.2.4. INSPECCIÓN VISUAL**

Es recomendable que la inspección visual de la estructura se lleve a cabo una vez que hayan cumplido las fases de antecedentes y revisión del proyecto original, pues la visita de inspección a la estructura debe basarse en la información recogida.

Como el objetivo principal de la investigación preliminar es determinar la naturaleza y extensión de los problemas observados, e identificar los miembros afectados, es indispensable adelantar un recorrido de la estructura para hacer un registro lo más completo posible de los daños. En este recorrido, se pueden identificar y registrar daños como los siguientes:

- Desplomes.
- Desalineaciones.
- Planos de falla y fisuras por agentes físicos.
- Cambios de aspectos de la masa.
- Fisuras estructurales.
- Deflexiones y movimientos.
- Fracturas y aplastamientos.
- Erosión.
- Descascaramiento.
- Exfoliación.
- Polvo.
- Desmoronamientos.
- Ablandamientos (pérdida de rigidez).
- Hinchamientos y reventones.
- Contaminación por polución.
- Cultivos biológicos (biocapa).
- Meteorización.
- Decoloración y manchado.
- Eflorescencias.
- Lixiviación.
- Cristalización.
- Reacciones deletéreas.
- Expansión.
- Biodeterioro.
- Corrosión del acero de refuerzo.
- Corrosión de otros metales embebidos.



Para ello, debe hacerse un levantamiento de los daños (tipo y magnitud) y su localización en un plano de daños. Este levantamiento debe ser completado con un registro fotográfico y/o filmico.

### V.2.5. MEDICIONES

En adición a la inspección visual, las investigaciones de campo deben incluir mediciones de los miembros, longitud de luces, deflexiones y desniveles encontrados en la estructura motivo de la investigación. En algunos casos, es indispensable realizar un levantamiento topográfico y/o altimétrico y/o batimétrico de las estructuras y localizar de manera precisa los daños. Los desplazamientos, fisuras, separaciones y distorsiones deben en la medida de lo posible, medirse y registrarse en el plano de daños. Algunas otras mediciones pueden ser importantes como:

- Humedades.
- Temperatura.
- Presión.

También debe considerarse que en muchos casos puede interesar instrumentar la estructura, para medir la evolución de algunas magnitudes como asentamientos, niveles, desplomes, movimientos relativos y actividad de fisuras.

### V.2.6. AUSCULTACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Las observaciones y medidas, pueden ser completadas con algunos ensayos de auscultación de la estructura y de sus miembros, mediante pruebas no destructivas. Sin embargo, debe tenerse presente que este tipo de ensayos ofrecen ayuda para identificar los sitios o zonas donde serian más útiles otro tipo de pruebas que puedan requerirse. Para ello, algunas de las pruebas no destructivas más usuales empleadas son las siguientes:

- *Localización de vacíos, delaminaciones y discontinuidades en el concreto.* La forma más rápida y barata de auscultar una estructura es el uso de un martillo convencional (o de geología), que por el sonido que despide puede indicar si hay presencia de vacíos, delaminaciones o discontinuidades superficiales en el concreto. Sin embargo, el sondeo de grandes áreas usando martillo resulta muy agotador por el tiempo requerido. Se dispone de métodos de sondeo más productivos cuando se trabaja con superficies horizontales. El arrastre de cadenas logra el mismo resultado que el sondeo con martillo. A medida que la cadena se arrastra a través de la superficie de concreto, se escucha un sonido marcadamente diferente cuando cruza encima de un área delaminada, con vacíos o discontinuidades.

También para este propósito se puede utilizar la termografía infrarroja, el cual es muy utilizado para detectar delaminaciones en tableros de puentes. Este método también se utiliza para otros componentes de concreto expuestos a la luz directa del sol. El método funciona con base en el principio de que al calentarse o enfriarse el concreto, existe un gradiente térmico sustancial dentro del concreto debido a que el concreto es pobre conductor de calor. Las delaminaciones y otras discontinuidades interrumpen la transferencia de calor a través del concreto. Estos defectos provocan una temperatura de la superficie más alta que el concreto circundante durante los períodos de calentamiento, y una temperatura de superficie más baja que el concreto circundante durante los períodos de enfriamiento. El equipo puede identificar y registrar áreas de Delaminación e indicar la profundidad de las delaminaciones por debajo de la superficie.

- *Localización de barras y recubrimiento (pachómetro).* La detección del acero de refuerzo, el espesor del recubrimiento y la prospección del diámetro de las barras, es posible mediante un localizador de barras, también conocido con el nombre de pachómetro, sin necesidad de remover la capa superficial del concreto. Este, es un equipo magnético que puede medir el recubrimiento hasta unos 30 cm de profundidad.

El radar penetra en el terreno o rayos X, son otros dispositivos usados para localizar metales embebidos en el concreto. Debe usarse el radar penetrante en el suelo para localizar varilla de acero de refuerzo u otros metales no magnéticos; sin embargo, los rayos X son el método más exacto. Un aparato de rayos X trabaja fotografiando el interior del concreto en cuestión, mostrando todos los objetos ahogados (similar a un estudio de rayos X en el pecho del cuerpo humano). La exposición de rayos X en cada localización tomará 30 minutos o más para penetrar el elemento de concreto. Mientras más grueso es el miembro, mayor es el tiempo requerido.

- *Resistencia a compresión en el sitio.* El martillo de rebote o esclerómetro, es un equipo que permite estimar la resistencia de la superficie con una exactitud de  $\pm 25\%$  aproximada del concreto, basadas en curvas de calibración con una limitada precisión. También permite comparar la calidad del concreto (uniformidad a nivel superficial) entre diferentes áreas de un espécimen o miembros estructurales. El método de rebote utiliza un macizo cargado por un resorte que se impacta en la superficie, haciendo que el mecanismo rebote. Se mide el rebote y se compara con la extensión inicial del resorte, generando un número de rebote

También se lleva a cabo la prueba de resistencia a la penetración ó pistola Windsor para medir la dureza de la capa superficial del concreto. El ensayo de resistencia a la penetración o pistola Windsor, también permite estimar de manera aproximada la resistencia del concreto, su uniformidad a nivel superficial y su calidad general. El método consiste en meter una sonda de una aleación endurecida de 6 mm de diámetro en el concreto, usando una carga de pólvora. La longitud expuesta de la sonda se mide y se usa para determinar la resistencia a compresión.

- *Localización de huecos, grietas y oquedades.* El método de eco de impacto funciona impactando la superficie de concreto con un impulso de esfuerzo de corta duración que es reflejado desde los defectos y las fronteras externas nuevamente hacia un receptor (transductor). Las señales recibidas son convertidas en un espectro de frecuencia y luego son visualizadas en una pantalla de computadora, la cual analiza las señales, pronosticando la probabilidad y profundidad de los defectos. El sistema trabaja rápidamente dando aproximadamente dos segundos para procesar cada lectura.

El método para localizar huecos, grietas u oquedades es el de velocidad de pulso ultrasónico, que consiste en emitir un pulso ultrasónico de un transmisor hacia un receptor y midiendo el tiempo de tránsito del pulso. Si se conoce la distancia entre el transmisor y receptor, puede determinarse la velocidad del pulso (distancia/tiempo). En general, mientras más denso y fuerte es el concreto que se está probando, mayor es la velocidad. La velocidad de las ondas de sonido a través del concreto se reduce por la presencia de huecos o grietas (véase figura V.2). La velocidad de tránsito es influenciada por la presencia de acero de refuerzo. Si el acero de refuerzo corre paralelo a la propagación de las ondas, la influencia del acero será alta, reduciendo así el tiempo de tránsito. Otro uso valioso de esta técnica es la evaluación no destructiva de grietas que han sido llenadas por inyección epóxica para determinar el monolitismo de la reparación. Además, también se puede determinar por estimación la uniformidad, calidad o resistencia a la compresión del concreto, mediante curvas de calibración previamente elaboradas.

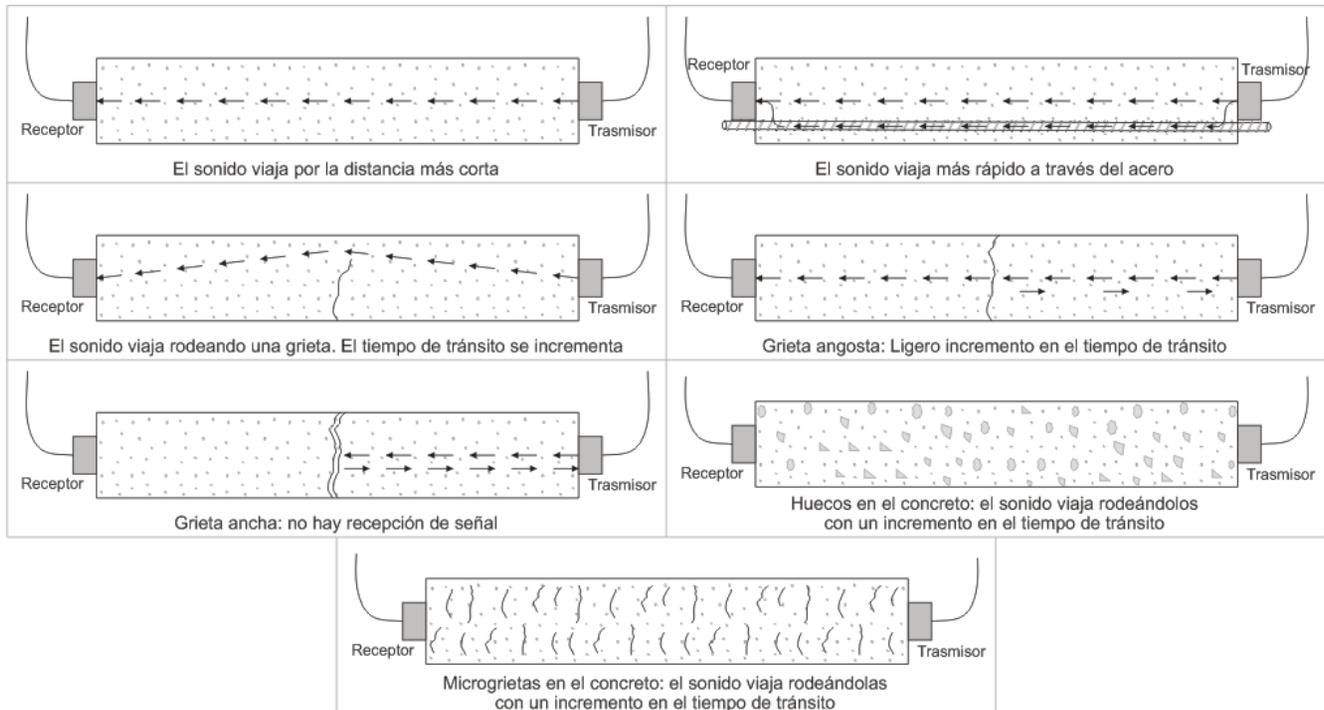
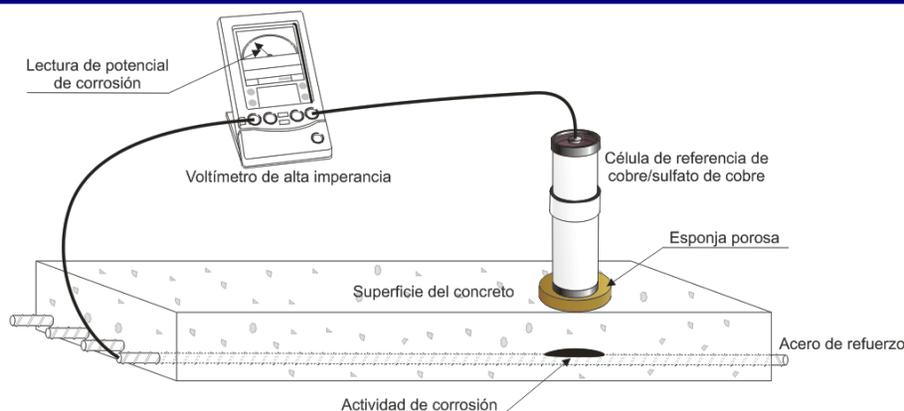


Figura V.2. Modos en que viaja el sonido a través del concreto, influenciado por diferentes obstáculos.

Otro método es el de vista a distancia dentro de la estructura. Las fibras ópticas (barrenoscopia), las cámaras de vídeo, y los periscopios son herramientas que permiten visualización a distancia. El método de fibras ópticas utiliza un manojito de fibras de vidrio que transmiten luz al sujeto que está siendo observado. Después las imágenes son transmitidas de vuelta a una lente para ser vistas con los ojos o con una cámara. Con este método, las vistas están limitadas a áreas pequeñas, ya que los agujeros taladrados pueden ser tan pequeñas de hasta 1/2 pulgada para la penetración del barrenoscopio. El uso de cámaras de vídeo y periscopios requiere de agujeros taladrados más grandes (hasta 2 pulgadas) y proporcionan un área de visión más grande del sujeto.

- *Mediciones de la actividad de corrosión.* Cuando el acero se corroe en el concreto, existe una diferencia de potencial entre las áreas anódicas de las semiceldas y las áreas catódicas de las semiceldas en el acero. Estas diferencias pueden ser detectadas colocando una semicelda de cobre-sulfato de cobre en la superficie del concreto y midiendo la diferencia de potencial entre el acero de refuerzo y una esponja mojada sobre la superficie del concreto (véase figura V.3). La celda de referencia conecta la superficie de concreto a un voltímetro de alta impedancia, el cual está también conectado eléctricamente al acero de refuerzo. Luego el voltímetro lee la diferencia de potencial en el lugar de la prueba. Estas lecturas se toman en una base de rejilla, y se convierten en un mapeo de gradiente de potencial.



**Figura V.3.** Configuración del equipo para la medición de la actividad de corrosión.

Generalmente se está de acuerdo en que mediciones de potencial de una semicelda pueden ser interpretadas como: Menos negativo que -0.20 volts indica un 90% de probabilidad de que no haya corrosión; Entre -0.20 y -0.35 volts, la actividad de la corrosión es incierta; Más negativo que -0.35 volts, indica una probabilidad mayor del 90% de que está ocurriendo corrosión. Si se obtienen lecturas positivas, generalmente significa que hay insuficiente humedad en el concreto y que las lecturas no son válidas. Estas pruebas no indican la velocidad de corrosión: la mediciones sólo manifiestan el potencial para que ocurra la corrosión en el momento de la medición.

- *Análisis petrográfico.* El análisis petrográfico es un examen detallado del concreto para determinar la formación y composición del concreto y para clasificar su tipo, condición y serviciabilidad. Para realizar este tipo de análisis, los especímenes de concreto se toman desde la estructura y se preparan, ya sea puliendo o picando con ácido una superficie del espécimen. El examen petrográfico incluye la identificación de los agregados minerales, la intercara entre el agregado y la pasta, la valoración de la estructura y la integridad de la pasta de cemento. El examen petrográfico ayuda a determinar alguno de los siguientes mecanismos: a) Resistencia a congelación y deshielo; b) Ataque a sulfatos; c) Reactividad álcali-agregado; d) Durabilidad del agregado; y e) Carbonatación.
- *Permeabilidad al agua y al aire.* La permeabilidad de un concreto está relacionada directamente a la porosidad de éste. La medida de la porosidad se realiza en trozo de concreto libre de grietas de 5 x 5 x 10 cm. Se seca en una estufa a 105°C hasta peso constante, luego se enfría en un desecador a temperatura ambiente y finalmente se pesa.

La muestra seca se sumerge en un vaso con agua y se hierve por un espacio de dos horas, se deja enfriar durante 12 horas, luego se seca superficialmente y se pesa. Se vuelve a sumergir la muestra en el agua y se pesa sin extraerlo de la misma. La porosidad por volumen de concreto se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ porosidad} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3}$$

Donde:

$P_1$  = Peso del concreto muestra original.

$P_2$  = Peso muestra de concreto seco.

$P_3$  = Peso del concreto sumergido en agua.



- *Contenido de humedad.* El contenido de humedad se calcula mediante la simple diferencia entre el peso de la mezcla humedad y el peso de la mezcla seca. La muestra extraída se coloca inmediatamente dentro de un frasco hermético. Esta muestra humedad se pesa dentro del frasco y tanto la muestra como el frasco y la tapa se colocan en una estufa a 105°C durante 24 horas. Se enfría en un desecador y se pesa, de esta manera se halla el peso de la humedad evaporable de los poros de la muestra.
- *Medidor de humedad.* El medidor nuclear de humedad estima el contenido de humedad del concreto endurecido, mediante el bombardeo de neutrones.

### V.2.7. EXPLORACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Durante la inspección preliminar, es probable que también se requiera alguna exploración de la estructura, mediante la remoción de algunas porciones superficiales del concreto, de trozos de descascamiento o desmoronamientos, partículas de polvo, capas de cultivos biológicos (biocapa), productos de lixiviación, cristalización, reacciones deletéreas o corrosión.

### V.2.8. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS, ENSAYOS Y ANÁLISIS

En una investigación preliminar, rara vez se extraen muestras de concreto. Pero cuando se práctica la extracción, estas muestras consisten en núcleos (extraídas según la norma ASTM C 42) o pequeños especímenes para hacer exámenes de carácter petrográfico.

Algunas veces se extrae polvo para hacer ensayos químicos, como la determinación del contenido de cloruros (ASTM C 1218). También se pueden tomar muestras de acero de refuerzo para ser analizadas y determinar su resistencia, dureza y contenido de carbono.

### V.2.9. INFORME PRELIMINAR

Con base en la información recogida, en la revisión de la capacidad estructural, en las observaciones adelantadas (inspección visual, mediciones, auscultaciones, y exploración de la estructura) y en los resultados de los eventuales ensayos efectuados, se elabora un informe cuya estructura básica puede ser la siguiente:

- Objetivo.
- Especificaciones de diseño y construcción.
- Resultados de la inspección y ensayos.
- Diagnóstico de daños.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

De acuerdo con el ACI 364, este documento debe ser concluyente en los siguientes aspectos:

- Capacidad estructural. Es decir, si los miembros o la estructura son adecuados para el uso previstos, si son adecuados para las cargas actuales.

- Si hay o no factibilidad de una posible rehabilitación, mediante una valoración técnica y económica, que se fundamenta en la efectividad esperada de la rehabilitación y su nuevo ciclo de vida actual esperado.
- Si se detectan problemas estructurales, estos se deben describir en términos de su seriedad, extensión y riesgo para la estabilidad. Lo anterior, permitirá establecer si se requiere o no acciones correctivas para remediar las condiciones existentes y simplemente proteger la estructura.
- Cuando se requiera un reforzamiento de la estructura, se deben estudiar alternativas que puedan satisfacer los requerimientos de carga hacia el futuro y el cumplimiento de la normatividad vigente. De ser posible, se debe contemplar el costo efectivo de reparar, reemplazar y reforzar los miembros estructurales existentes.
- Por último, se deben identificar si es necesario o no adelantar una investigación detallada. Sobre este aspecto, deben especificarse los objetivos, los datos adicionales y la información requerida, para satisfacer los objetivos propuestos. También es importante indicar el tiempo y el costo requerido para la investigación detallada.

### **V.3. INVESTIGACIÓN PROFUNDA O DETALLADA**

Teniendo presente que la investigación profunda o detallada es un complemento de la investigación preliminar, el ACI 364 sugiere que los hallazgos de la investigación detallada influyen de manera directa, el resultado final del proceso de evaluación, la selección de los métodos de rehabilitación que se consideren, el costo estimado de cada alternativa de rehabilitación, y por último, la selección del método apropiado de rehabilitación. Por lo tanto, se debe poner especial cuidado en la planeación y ejecución de la investigación detallada. En general, es recomendable que una investigación detallada contemple los siguientes aspectos:

#### **V.3.1. DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO**

Con el objeto de completar la información obtenida en la investigación preliminar (revisión del proyecto original), es conveniente obtener y revisar todos los documentos adicionales que estén relacionados con la estructura. Esta información incluye: información del diseño estructural, información de materiales, información de la etapa constructiva e historia de la estructura.

##### **v.3.1.1. Información del diseño estructural**

Además de la información concerniente a la estructura en la investigación preliminar, es conveniente obtener la siguiente información complementaria:

- Planos de la construcción realmente ejecutada.
- Planos de modificaciones, adiciones y/o reparaciones que haya tenido la estructura durante la vida útil de servicio.
- Copia de los códigos y normas vigentes durante el diseño y la construcción.
- Estudio de durabilidad, vulnerabilidad o patología que previamente se hayan realizado.
- Las entrevistas con personas que hayan participado en la fase de diseño, son de gran utilidad para ahorrar tiempo y dinero. También, es útil visitar las



oficinas públicas que otorgan licencias de construcción y/o registros de construcciones.

Cuando se trate de una preservación o restauración (por ejemplo, monumentos, edificaciones y estructuras con valor histórico o de conservación arquitectónica), es indispensable determinar si la rehabilitación está cobijada por leyes y restricciones municipales, departamentales o nacionales.

#### V.3.1.2. Informe de materiales

Se debe solicitar la calidad de los materiales utilizados en la construcción, la cual puede ser obtenida del propio contratista o proveedor:

- Especificaciones y referencias de materiales empleados.
- Registro de calidad de los componentes de concreto.
- Diseño y dosificación de las mezclas.
- Registro del control de calidad del concreto.
- Tipo y duración de las condiciones de curado.
- Registro del control de calidad del acero de refuerzo, cables y torones.
- Registro del control de calidad de otros materiales (prefabricados, ladrillos, etc.).

#### V.3.1.3. Información de la construcción

Para obtener información sobre los procedimientos constructivos, el avance de la programación de obra, los eventos de excepción o las contingencias, las condiciones de protección y curado de la estructura y la puesta en servicio de la misma, es conveniente adelantar una entrevista con personas que hayan intervenido durante esta fase del proyecto. Ello, también, ahorra mucho tiempo y dinero. Además, algunos documentos de invaluable importancia pueden ser los siguientes:

- Bitácora de obra y correspondencia durante la construcción.
- Fotografías y registros fílmicos de la construcción (si están disponibles).
- Reportes técnicos y/o actas de avance de obra.
- Registros documentables durante la obra (nivelaciones, asentamientos, levantamientos topográficos, etc.).
- Planos y documentos de cambios sobre la marcha de la obra.

#### V.3.1.4. Historial de servicio

Otra fuente importante de información, son las entrevistas con personas que hayan vivido las diferentes etapas y sucesos que haya tenido la estructura durante su vida de servicio. Sobre todo, para documentar la cronología de los daños. También, sobre todo en instalaciones industriales u otras, es muy importante tener entrevistas con personal de operación y mantenimiento.

Además, si la estructura ha tenido intervenciones previas es conveniente obtener documentación sobre la manera y la época en que éstas se adelantaron. También algunos documentos que pueden ser de utilidad son los siguientes:

- Archivo de propietarios, administradores, usuarios y/o compañías de seguros pasados y actuales.
- Archivos de mantenimientos rutinarios, reparaciones, remodelaciones, modificaciones y adiciones.
- Archivos de propietarios de predios vecinos.
- Registro de tradición y libertad del predio, obtenidos de los oficinas públicas.
- Reporte del clima y eventos geológicos, geotécnicos, sísmicos, huracanes, etc.
- Registros fotográficos o fílmicos de eventos y sucesos normales (registros históricos) o fortuitos (fuego, explosiones, sobrecargas, viento, sismos, etc.).

#### **v.3.1.5. Registro de la información**

Toda la información obtenida en los pasos anteriores, debe ser debidamente obtenida, registrada, clasificada y archivada, para facilitar su consulta y ponerla a disposición del dueño o la persona en quien vaya a recaer la rehabilitación.

### **V.3.2. EXAMEN DE LA ESTRUCTURA**

Al igual que la investigación preliminar, es recomendable que el examen de la estructura en la investigación detallada, se lleve a cabo una vez que se hayan estudiado toda la documentación del proyecto (incluyendo el informe preliminar), ya que la metodología y las estrategias que se adopten durante el examen de la estructura deben basarse en la información recogida.

Por otra parte, debido a que seguramente la información obtenida en la inspección visual realizada durante la inspección preliminar, es de carácter superficial, es conveniente adelantar un examen detallado de la estructura no solamente en su superficie, sino también al interior de los miembros. Para llevar a cabo este examen, deben contemplarse los siguientes aspectos: planeación y preparación para el examen, verificación de la estructura en campo, valoración de la condición actual, condición de seguridad y riesgo potencial.

### **V.3.3. PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN PARA EL EXAMEN**

#### **v.3.3.1. Proceso científico**

Antes de iniciar cualquier actividad relativa al examen de la estructura, es conveniente hacer una visita de reconocimiento al lugar de la construcción y se recomienda hacer un registro fotográfico o fílmico de esta actividad, para definir los siguientes aspectos:

- Los recursos humanos (Personal, entrenamiento, cursos de seguridad industrial, etc.) y físicos que se requieran (equipo normal o especializado).
- Determinación de la necesidad de servicios especializados (topografía y nivelación, batimetría, grúas extensibles, inspección sumergida mediante buzos, servicios especializados de laboratorio de materiales, etc.).
- El período de tiempo en el cual se puede realizar la inspección, con mínima interrupción).



- Requerimientos de permisos y documentos especiales.
- Necesidad de evacuar y cerrar la estructura durante el examen.
- Tipo de equipo que se requiere para acceder a la estructura (andamios, arneses, equipo de seguridad, etc.).
- Disponibilidad de agua, energía, etc.
- Remoción de acabados, instalaciones, muebles, etc.

#### **v.3.3.2. Verificación de la estructura en campo**

En primera instancia debe medirse la geometría (secciones transversales y longitudinales) y ubicarse la disposición de los diferentes elementos (especialmente los más críticos). De igual modo, deben revisarse y registrarse todas las anomalías, defectos y fallas que muestre la estructura (por ejemplo, grietas, delaminaciones, pérdidas de sección, etc.). Es muy probable también que haya necesidad de practicar algunas mediciones, auscultaciones y exploraciones adicionales, a la que se realizaron en la inspección preliminar. Lo anterior, es de extrema importancia para definir los sitios de toma de muestras para realizar ensayos de caracterización de fenómenos (por ejemplo, profundidad de fisuras) y materiales (acero, concreto, cables, elementos embebidos, etc.).

Durante la inspección y verificación, deben establecerse las cargas existentes y actuantes sobre la estructura. Por ejemplo, deben verificarse las cargas muertas actuales y futuras, las cargas impuestas según el uso normal, de excepción (condiciones particulares).

Para el caso de bodegas y patios de almacenamiento, es conveniente establecer las cargas usuales, los procedimientos de almacenamiento, la frecuencia y el tiempo de almacenamiento. Pero sobre todo si han existido o existen sobre cargas.

También, sobre todo en instalaciones portuarias, industriales y manufactureras, es importante establecer la influencia de cargas dinámicas, como consecuencia de la operación de equipo y maquinaria que pueden transmitir vibraciones, impactos, punzonamientos, cargas puntuales u otras sollicitaciones adicionales a la estructura.

#### **v.3.3.3. Valoración de la condición actual**

Para adelantar un examen completo de la estructura, sin dejar pasar daños que pueden pasar inadvertidos, se puede acudir a la excelente lista de chequeo que tienen el ACI 201.1R, en la cual se incluyen los siguientes capítulos:

- Descripción de la estructura o el pavimento.
- Condiciones actuales de la estructura.
- Naturaleza de las cargas y elementos deteriorados.
- Condiciones originales de la estructura.
- Materiales de construcción.
- Prácticas constructivas.

Las fotografías y los registros filmicos, son muy útiles en esta fase, para establecer con precisión el tipo de daño, la magnitud del mismo y la cantidad de su presencia en la estructura o sus miembros. También, en esta valoración debe incluirse el estado en que se encuentran las posibles reparaciones que haya tenido la estructura. Las valoraciones deben incluir aspectos como:

- Tipos de grietas (estructurales y no estructurales) y modalidad del agrietamiento (por ejemplo, flexión, cortante, aplastamiento, etc.). Patrón de comportamiento, localización, ancho, profundidad, longitud. Si se han instalado testigos en la inspección preliminar, o antes, debe registrarse el comportamiento de las mismas para establecer si se trata de fisuras activas o pasivas.
- Deben practicarse medidas (cuantitativas y cualitativas) de otros daños como erosiones, descacaramiento, ablandamiento, cultivos biológicos, eflorescencias, etc.
- Si existen ataques químicos, debe establecer el tipo de producto, su estado (gas, líquido o sólido) y si es posible concentración.
- Si existen manifestaciones de corrosión, éstas deben localizarse, registrarse e indicar el estado de avance del daño (por ejemplo, incipiente, tipo de corrosión, pérdida de sección de barras, etc.).
- Reporte de la presencia y estado de los elementos embebidos, conectores para prefabricados, soportes, etc.
- Registro de la magnitud de deformaciones permanentes o transitorias de los diferentes elementos, incluyendo no sólo aquellas que obedecen a comportamiento bajo carga, sino también a desplomes, desalineaciones, desproporcionadas, etc.
- También deben cuantificarse y monitorearse el estado de los niveles, asentamientos y rebotes del terreno.
- Si existen filtraciones, encharcamientos o falta de drenaje de agua u otras sustancias, estas deben quedar debidamente registradas.

#### **V.3.3.4. Condiciones de seguridad y riesgo potencial**

En el evento de que se detecten situaciones de riesgo, como consecuencia de los defectos y daños que tenga la estructura, deberá valorarse la condición de seguridad y riesgo potencial que aquello implique. Lo anterior, incluye la evacuación y/o cierre temporal, el apuntalamiento u otras medidas de seguridad.

#### **V.3.3.5. Valoración de las lesiones**

Incluso tratándose de grietas escasamente importantes que no significan el menor peligro, es conveniente dejar establecida siempre la naturaleza de la lesión, su alcance y los motivos que la originaron.

En cualquier caso una grieta indica un estado anómalo, y por regla general es un síntoma significativo de la existencia de una lesión. La primera prueba a efectuar será la establecer si la grieta objeto de estudio supone un peligro para la estructura.

Esto es lo que suelen hacer los profesionales, recurriendo al auxilio de un simple recurso práctico que puede aclarar si una grieta que acaba de aparecer de improviso en un muro o en un elemento estructural, sea cual sea el material con que este hecho, es peligrosa o de tratar simplemente, de la consecuencia de un proceso de dilatación, en cierta forma considerado como natural: nos referimos al «tarjetón de yeso» denominado también «testigo».

El tarjetón de yeso consiste en una señal que se coloca en los bordes de la grieta para comprobar si continúa ensanchándose, es decir, para determinar si la fisura está viva o si permanece invariable. La misión de este testigo consiste en colocar al paramento dos pellas de yeso, de manera que la grieta (que quedará debajo por supuesto), atraviese el testigo aproximadamente por la mitad. Con el rotulador o con un marcador que indicará el trayecto que sigue la grieta, procurando señalar con la máxima exactitud posible la situación de las bocas de entrada y de salida, así como la amplitud y la anchura de la hendidura en aquellos dos puntos (véase figura V.4).

Al cabo de un cierto lapso de tiempo, que varía según las circunstancias de cada caso, una simple lectura del testigo bastará para determinar si se han producido variaciones y cual es su importancia. No solo la grieta puede abrirse y acusar mayor anchura, sino también la pared puede desplazarse y tal movimiento, en el supuesto de producirse, quedaría reflejado en la anotación correspondiente. De esta sencilla manera es posible detectar la tendencia de un paramento a su agrietamiento.

En ocasiones, el diagnóstico de la lesión requiere conocer con exactitud la variación que experimenta la grieta durante un período de tiempo determinado, es decir, interesa saber milimétricamente, el movimiento de la hendidura y conocer si el ancho se mantiene estático, o si ha experimentado un incremento, en qué dirección y en qué cuantía.

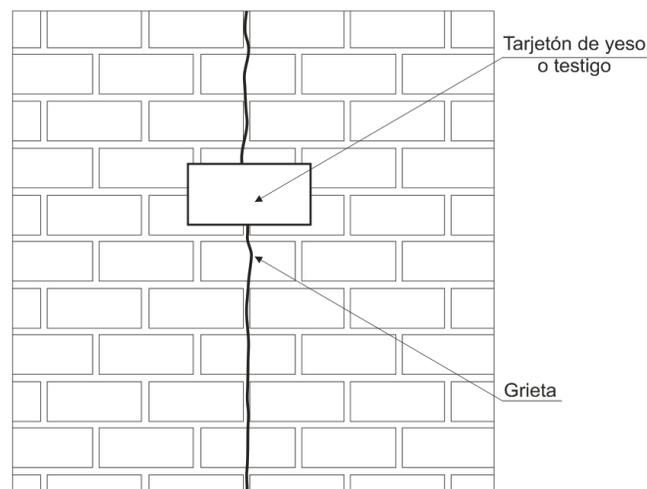
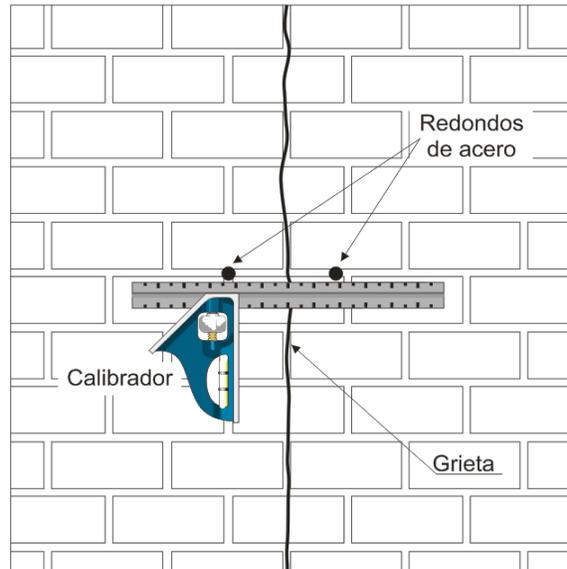


Figura V.4. Testigo para determinar el movimiento de una grieta, sobre un muro de fábrica de ladrillo.

En estos casos puede recurrirse al sistema que se expone en la figura V.5. Se hincan dos redondos de hierro de un calibre de 12 a 14 mm de diámetro, previamente aguzados por uno de sus extremos para facilitar su fijación en el muro. Bastará con que la cabeza sobresalga del nivel del paramento unos 10 cm. Ambos elementos se clavan en sentido horizontal, a un lado y a otro de los bordes de la grieta y en una distancia similar.



**Figura V.5.** Sistema para determinar con cierta exactitud, las variaciones experimentadas por una grieta durante un plazo de tiempo determinado.

Una vez realizada tal operación, y por intermedio de un calibre, se mide la distancia con fidelidad. Se anota la medida que indique el limbo, así como el día y la hora en que se efectuó la medición. Posteriormente, y a intervalos de tiempo iguales (que pueden ser de 24, 48, 96 horas, etc.), se repite la operación y se anotan los datos consiguientes. El procedimiento, a pesar de su elemental sencillez, permitirá si hay variación y cual es el ritmo con que se desarrolla.

#### V.3.3.6. Testigo para determinar movimientos de flexión

Otros sistema también elemental, para controlar los posibles pandeos de los elementos horizontales por exceso de peso propio o sobrecarga añadida, es el conocido «método de junquillo». Su aplicación puede considerarse para casos en los que se quiere determinar el pandeo de un elemento ya sea por peso propio o por sobrecargas impuestas.

Para determinar los movimientos que experimenta un elemento hay que introducir un junquillo a presión procurando que su plano sea perfecto. Habrá que tomar todas las precauciones posibles para que, ante un posible movimiento, el junquillo de madera no resbale desprendiéndose de cualquiera de sus dos puntos de apoyo. Por ejemplo, puede aplicarse una pallada de yeso para asegurar la sujeción. Si el junquillo está cortado a la longitud exacta y se introduce con habilidad entre los dos planos superiores e inferior, la presión será suficiente para que se mantenga en la posición exacta.

Una vez colocado el testigo, cualquier movimiento de flexión que se produzca en dos planos que sustentan el junquillo, lo acusará éste: arqueándose sobre sí mismo, es decir, mientras el junquillo permanezca vertical, sin alterarse lo más mínimo, nada habrá ocurrido; al flexionarse indicará una variación estática en uno o en ambos planos horizontales.



---

### V.3.4. ENSAYOS A LA ESTRUCTURA Y TOMAS DE MUESTRAS

Cuando no se tiene la información adecuada y necesaria para establecer la condición de la estructura y sus materiales componentes, seguramente habrá necesidad de realizar ensayos complementarios a los que se efectuaron durante la investigación preliminar y extraer muestras de los materiales. Los ensayos a la estructura generalmente incluyen la evaluación de la resistencia por medios no destructivos, para lo cual se recomiendan los documentos ACI 437R y ACI 228.1R. La extracción de muestras (núcleos y polvo), para ser analizados en el laboratorio, es recomendable que se realice en zonas sanas y en zonas en donde hay sospecha de materiales defectuosos.

#### V.3.4.1. Localización y frecuencia

De acuerdo con el ACI 364.1R, la selección de los métodos de ensayo apropiados, el número de ensayos y la localización de los sitios de muestreo depende de los siguientes factores:

- La variación de características.
- Localizaciones críticas.
- Probabilidad de error en los resultados de ensayos.
- El tamaño de la estructura.

Sin embargo, la norma ASTM C 823 provee una guía bastante adecuada para el desarrollo de un programa de muestreo. Cuando se desee obtener información estadística acerca de las propiedades del concreto, la localización de los sitios de muestreo debe ser aleatoria a lo largo de la estructura. Para los ensayos en que se requiera medir el valor promedio de una propiedad del concreto, como por ejemplo, la resistencia, el módulo de elasticidad o el contenido de aire, el número de muestras debe definirse de acuerdo con la norma ASTM E 122. Para estos casos, el número de muestras depende de:

- La máxima diferencia o error permisible entre el valor promedio y el valor real.
- La variación entre los resultados de ensayo.
- El riesgo que se esté dispuesto a aceptar en caso de que la diferencia permisible sea excedida.

En la toma de muestras se tendrán todas las precauciones para que las muestras del concreto sobre el cual se realizarán los ensayos representan lo más fielmente posible la composición, sobre todo, las sales solubles que existían en el elemento objeto del estudio. Se debe extraer el menor número de muestras posibles, ya sea por su costo o porque no es recomendable tomar más de dos muestras por cada elemento, estas muestras se fraccionarán como se considere lo más conveniente, con el fin de poder realizar todos los ensayos.

Más cuando sea necesario, la exploración de un elemento, con determinaciones en diversos puntos, se realizarán perforaciones de pequeño diámetro con taladros adecuados y recogida de polvo en fundas. Tanto los testigos como las fundas se numerarán convenientemente, indicando con claridad el lote o la fracción a la que pertenecen, así como su ubicación exacta, apoyando con la ayuda de fotografías.

#### **V.3.4.2. Extracción de núcleos**

Los núcleos de concreto para determinar la resistencia mecánica o el módulo de elasticidad, deben extraerse de acuerdo con la norma ASTM C 42, en una cantidad no inferior a tres por cada zona de la estructura y el diámetro de cada núcleo debe ser por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado presente en el concreto. La resistencia determinada, será el promedio de los tres valores obtenidos.

Cuando se extraigan núcleos sobre zonas agrietadas, estas no deben emplearse para determinar la resistencia mecánica o el módulo de elasticidad del concreto.

#### **V.3.4.3. Extracción de muestras de polvo**

Las muestras de polvo, para realizar ensayos químicos, deben ser extraídas mediante un taladro provisto de un recuperador de polvo, a las profundidades determinadas por quien esté adelantando la investigación.

#### **V.3.4.4. Extracción de probetas del acero de refuerzo**

Las muestras de acero de refuerzo para determinar sus propiedades físicas, químicas y/o mecánicas, deben ser tomadas de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM A 370. Las barras que se remuevan de la estructura, deben ser reemplazadas (incluyendo su longitud de desarrollo), si así lo demanda el diseño estructural. Para ello, además se deben contemplar las siguientes consideraciones:

- Las probetas se deben remover de zonas donde el refuerzo esté sometido al mínimo esfuerzo y no más de una probeta se extraerá de la misma sección transversal de un miembros estructural.
- Se debe respetar la longitud de desarrollo de las varillas, para evitar el debilitamiento del elemento afectado para la extracción de la probeta.
- Para elementos estructurales que tengan una luz de menos de 7.5 m o un área cargada de menos de 60 m<sup>2</sup>, se deben tomar por lo menos una muestra del refuerzo principal.
- Para luces o áreas mayores, se debe tomar un mayor número de muestras.

### **V.3.5. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS**

Dependiendo de los objetivos y el alcance de la investigación detallada, se pueden realizar los siguientes ensayos, previa inspección visual de la muestra y su correspondiente registro fotográfico.

**V.3.5.1. Ensayos físicos** (véase figura V.6)

**V.3.5.2. Ensayos mecánicos** (véase figura V.7)

**V.3.5.3. Ensayos químicos** (véase figura V.8)

**V.3.5.4. Ensayos biológicos** (véase figura V.9)

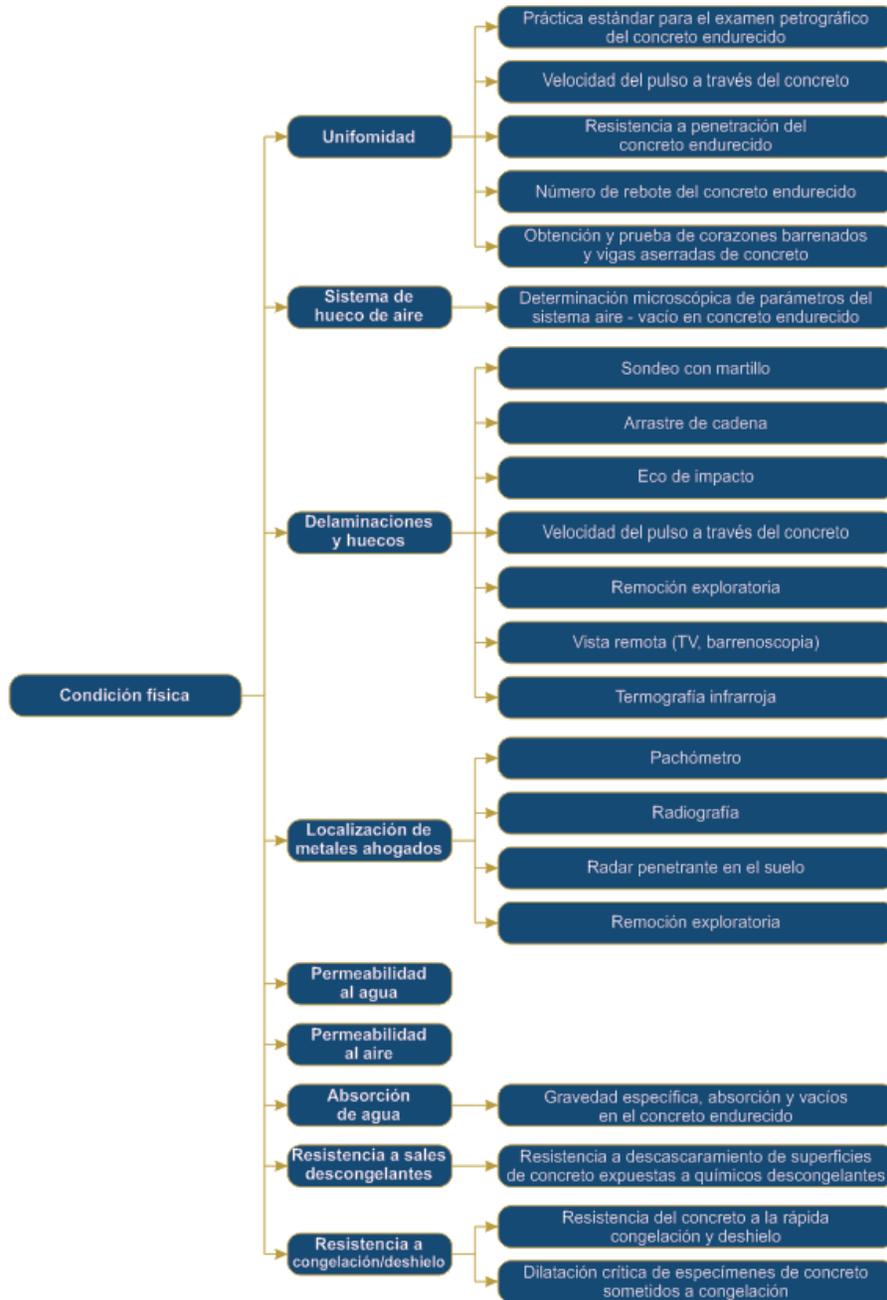
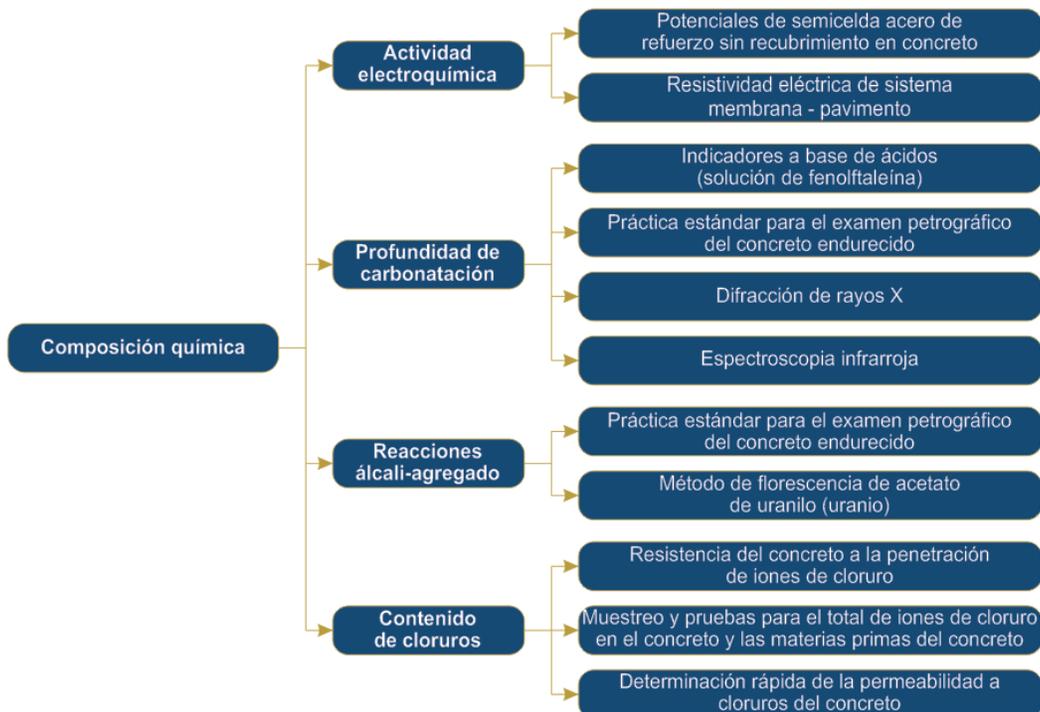


Figura V.6. Métodos de prueba para evaluar la condición física del concreto basadas en las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials).



**Figura V.7.** Métodos de prueba para evaluar las propiedades mecánicas en el concreto basadas en las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials).



**Figura V.8.** Métodos de prueba para la evaluar la composición química del concreto basadas en las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials).



Figura V.9. Métodos de prueba para evaluar la actividad biológica en el concreto.

### V.3.6. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

La evaluación estructural se adelanta con el objeto de determinar la capacidad real que tiene la estructura para tolerar cargas. Esta labor es mejor adelantarse después de que se haya realizado el examen de la estructura, se hayan determinado las dimensiones y geometría de los elementos, así como los ensayos a la estructura y los materiales. Desde luego, hay daños que no afectan la integridad mecánica de la estructura y cuya reparación puede hacerse sin necesidad de entrar en un análisis estructural. Sin embargo, cuando hay sospecha de que la estabilidad estructural puede estar comprometida, se hace indispensable adelantar una evaluación estructural. Esta se pueden llevar a cabo, mediante los siguientes métodos:

- Métodos empíricos.
- Métodos analíticos.
- Pruebas de carga.

### V.3.7. INFORME FINAL

Tomando en consideración el **Informe preliminar** y toda la información recogida en la **Investigación detallada**, se elabora un informe cuya estructura básica puede ser la siguiente:

- Presentación (objetivo y alcance de la investigación).
- Descripción de la estructura.
- Documentación del problema.
- Levantamiento de daños.
- Localización de muestras y determinación de ensayos.
- Resultado de los ensayos.
- Análisis y evaluación de los ensayos.
- Evaluación estructural.
- Diagnóstico de daños.

- Pronóstico sobre el comportamiento de la estructura.
- Recomendaciones de intervención.
- Precauciones de seguridad.

#### V.4. DISEÑO DETALLADO DE LA SOLUCIÓN

Esta es la clave de la solución. No se puede empezar una intervención duradera y efectiva sin un diseño bueno y detallado de la misma, en el cual queda explícito y claro la calidad de los materiales, la forma de ejecución, los controles de servicio, la especificación de los equipos a usar, como se indica en la figura V.10.



Figura V.10. Etapas que constituyen un diseño detallado de la solución de un problema patológico.

#### V.5. CONCLUSIÓN

La evaluación de estructuras de concreto se lleva a cabo de manera sistemática y ordenada tal como nos lo marca la «**Patología de la construcción**». Esta evaluación nos permitirá predecir el comportamiento que tendrá en el futuro la estructura bajo las condiciones de servicio esperadas.

La evaluación de una estructura de concreto, consiste una serie de pasos que investigan, examinan y analizan los antecedentes históricos que ha tenido la construcción ante diferentes acciones a que se ha visto sometida, para así poder, emitir un informe del comportamiento futuro de la construcción.

La evaluación de una estructura puede consistir en una investigación preliminar donde se busca acopiar información inicial acerca de las condiciones de una estructura, el tipo y seriedad de los problemas que presenta, así como factibilidad de llevar a cabo estudios complementarios y su rehabilitación posterior.



Asimismo, la evaluación de una estructura puede consistir en una investigación detallada o profunda, que es un complemento de la investigación preliminar, donde se busca formular el método de rehabilitación y el costo estimado de la rehabilitación, aquí es en donde se llevan a cabo los ensayos a la estructura, toma y análisis de muestras de materiales, además se seleccionan de los materiales adecuados para la reparación y se ejecuta una informe final por escrito que considere y recabe toda las información investigada y formulada.

## **CAPÍTULO VI**

### **MATERIALES DE REPARACIÓN**

#### **VI.1.INTRODUCCIÓN**

Este capítulo tiene como objetivo dar una visión de la gama de materiales que pueden ser usadas para las reparaciones, refuerzos y protección de estructuras de concreto. Dentro de este grupo algunos han sido concebidos para el uso conjugado con otros, formado un sistema de reparación o protección, como por ejemplo ciertos «primer» que actúan como puente de adherencia o protección del acero de refuerzo y algunos morteros para juntas.

Dado que los daños de una estructura pueden ser motivados por acciones de tipo mecánico, físico, químico o biológico, y aún dentro de cada uno de estos cuatro tipos, pueden ser a consecuencia de acciones muy diferentes, es fácil comprender que tienen que existir una gama de materiales muy amplia y con características muy distintas que permitan resolver el problema que se presenta con la mayor garantía, la máxima eficacia y el menor costo, además debe poseer el material utilizado propiedades protectoras o resistentes frente a las acciones ambientales y en algunos casos accidentales como pueden ser la del fuego.

Se pueden considerar como especificaciones básicas a cumplir con los materiales a emplear en reparaciones y refuerzos las siguientes:

- Ser más durables que el material estructural existente.
- Proteger el acero mejorando la alcalinidad del concreto que lo rodea y haciendo a éste impermeable.
- Poseer una buena estabilidad dimensional con una mínima retracción y fluencia.
- Presentar una buena adherencia tanto con el acero como con el concreto.

Los materiales empleados para estos fines pueden ser muy variados, desde el simple mortero y concreto tradicional hasta mezclas especiales de materiales poliméricos. En una primera clasificación los materiales se pueden agrupar en tres grupos: materiales de base inorgánica dentro de los cuales están los que llevan conglomerantes de cemento portland y cementos especiales; los de base orgánica donde se incluyen los aglomerantes de base polimérica; y los base mixta formados por mezclas de los dos anteriores.

Se consideran también como materiales de reparación y refuerzo las armaduras sean de acero o especiales.

#### **VI.2.ELECCIÓN DEL MATERIAL DE REPARACIÓN Y REFUERZO**

No todos los materiales disponibles pueden aplicarse para todo tipo de reparaciones dado que muchas veces existen limitaciones motivadas por las propias características del material, por las condiciones del soporte sobre las que ha de aplicarse, por las condiciones ambientales de temperatura y humedad, etc.



Los factores que influyen a la hora de la elección de un material podemos resumirlo en los siguientes:

- *Compatibilidad con los componentes del concreto.* Hay materiales que por su propia composición pueden tener compuestos químicos que reaccionen con la cal liberada o con algunos de los componentes hidratados producto de la hidratación del cemento, con lo cual pueden producirse elementos secundarios de débiles características, expansivos o lixiviables.
- *Solicitaciones mecánicas a las cuales van a estar expuestos.* Muchos materiales puede que no posean suficientes resistencias para soportar las acciones mecánicas a las que estarán expuestos, o su módulo de elasticidad sea tan bajo que dé lugar a deformaciones diferenciales cuando trabajen conjuntamente con el concreto, con lo cual su uso quedará limitado.
- *Solicitaciones físico-químicas o térmicas a las que estarán expuestos.* Otros materiales puede que sean incapaces de soportar las acciones de tipo físico y químico con las que se encontrarán, bien sea abrasión, ciclos hielo-deshielo, etc., o las acciones de tipo agresivo que determinados agentes químicos pueden ejercer sobre éstos. Lo mismo puede decirse de las acciones de origen térmico que quizás originen acciones importantes cuando se producen cambios de temperatura motivadas, por ejemplo, por poseer coeficientes de dilatación térmica muy diferentes.
- *Condiciones de humedad y temperatura.* Las condiciones de humedad que posee el soporte sobre el que se realizará la aplicación pueden obligar a elegir unos materiales u otros, pues hay muchos materiales, especialmente de base orgánica, que no pueden aplicarse sobre superficies húmedas. La temperatura ambiente y del soporte pueden determinar los materiales y rechazar otros debido a que quizás no adquieran las suficientes resistencias o que incluso no llegue a producirse la polimerización si la temperatura es baja, o por el contrario, el tiempo de aplicación se reduzca mucho si la temperatura es alta.
- *Extensión y grado de daños.* No todos los materiales permiten ser aplicados en grandes masas, unas veces por su precio y otras debido a la propia exotermicidad de sus reacciones de hidratación o de polimerización.
- *Espesor de la capa a aplicar.* La propia exotermicidad de las reacciones de polimerización, como ocurre con los poliéster, o la retracción del tipo hidráulico o térmico de un material puede ser motivo para eliminarlo a la hora de aplicarlo en espesores por encima de un determinado valor.
- *Resistencia del concreto a reparar.* Este es otro factor a considerar a la hora de elegir un material e incluso la contribución que puede darse al concreto existente en el trabajo conjunto del elemento reparado.
- *Lugar de aplicación.* Este es otro factor a tener en cuenta a la hora de elegir un material, pues según se trate de aplicaciones superficiales, inyecciones, relleno de anclaje, aplicaciones en interiores, etc., puede ser aconsejable emplear un material u otro.
- *Tiempo disponible para la aplicación.* Existen reparaciones que exigen alcanzar resistencias a muy corto plazo con el fin de que entre en servicio el elemento en el tiempo más corto posible, esto es normal en el caso de reparaciones de pistas de aterrizaje, carreteras, etc. En estos casos habrá que emplear materiales no tradicionales con base inorgánica o bien con base orgánica que cumplan con las características de alta resistencia iniciales.

---

### **VI.3.EFECTOS POR CAMBIO DE VOLUMEN**

Uno de los retos más grandes en la selección de materiales de reparación consiste en mantener su compatibilidad dimensional relativa con respecto al sustrato. Los cambios de volumen relacionados con la humedad en los materiales de reparación (contracción por secado) causan muchas fallas de reparación: agrietamiento por contracción, delaminación, pérdida de capacidad para soportar cargas, corrosión del acero de refuerzo ahogado y pobre apariencia. La selección de los materiales de reparación con mínima contracción por secado es crítica para reparaciones durables.

El seleccionar materiales de reparación con mínima contracción por secado requiere de una muy buena comprensión del proceso de contracción por secado. La mayoría de los materiales de reparación que son mezclados y colocados, tienen una cantidad excesiva de agua por arriba de la que se requiere para la hidratación. A medida que se permite que la reparación seque y se absorba la humedad por el ambiente que lo rodea, el material se contrae en volumen y el esfuerzo de tensión empieza a acumularse en el material de reparación. El curado húmedo de los materiales cementantes pospondrá el comienzo del proceso de secado, y puede causar una ligera expansión.

### **VI.4.MATERIALES DE BASE INORGÁNICA**

La base fundamental de estos materiales es el cemento, sea portland o no, pudiendo clasificarse en materiales de base inorgánica tradicionales y de base inorgánica no tradicionales.

Los tradicionales emplean como conglomerante un cemento portland y pueden aplicarse como lechadas, morteros, microconcretos y concretos. Las características de estos materiales, resistencias, retracción, adherencia, durabilidad, etc., son muy conocidas al ser materiales de uso común.

Los no tradicionales pueden emplear cemento portland, portland aluminoso, mezclas de ambos, cementos sin retracción o de expansión controlada, cementos a base de fosfato de magnesio o aluminio, etc. Sus características son menos conocidas al no emplearse con frecuencia y pueden ser muy variables, según su composición, dando lugar a lechadas, morteros o concretos de retracción compensada, de fraguado o de endurecimiento rápido, altas resistencia a corto plazo, etc. Para el uso de éstos es recomendable hacer pruebas previas antes de usarlos de forma masiva.

#### **VI.4.1. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA**

Se denominan concretos de alta resistencia a aquellos que teniendo densidades normales comprendidas entre 2,300 y 2,600 kg/m<sup>3</sup> poseen resistencias a compresión superiores de los 500 kg/cm<sup>2</sup>. Por encima de esta resistencia límite inferior se consideran concretos de muy alta resistencia los que tienen resistencias superiores a los 700 kg/cm<sup>2</sup> y superconcretos a los que sobrepasan los 1,000 kg/cm<sup>2</sup>.

Los concretos de alta resistencia son muy cuidados y su relación agua/cemento es muy reducida, del orden de 0.3 a pesar de lo cual poseen una alta trabajabilidad gracias al empleo de aditivos reductores de agua de alto rango o superfluidificantes, de agregados muy resistentes y de granulometría cuidada, de altas dosificaciones de cemento y del empleo de microsilíce que por su elevado carácter puzolánico y alta superficie específica reaccionan con facilidad con la cal.

Las características principales de estos concretos, aparte de sus elevadas resistencias a compresión y tensión, son: baja retracción hidráulica, baja fluencia, elevado módulo de elasticidad, gran resistencia a la abrasión e impacto y alta impermeabilidad y durabilidad.



Este tipo de concreto se puede considerar como nuevo y sus aplicaciones en el campo de las reparaciones es creciente, habiéndose empleado con mucho éxito en la reparación de zonas dañadas por cavitación y erosión en aliviaderos y compuertas de presas y su uso se ha extendido a las reparaciones estructurales.

Los cementos no son especiales, empleándose preferentemente los que no llevan incorporadas adiciones y con dosificaciones de 450 a 500 kg/m<sup>3</sup>. Suelen ser preferibles los de bajo calor de hidratación por su menor exotermicidad y más reducida demanda de agua.

Los agregados gruesos empleados deben proceder de la trituración de basaltos y calizas muy sanas con tamaño máximo que no superen los 20 mm, los que mejores resistencias proporcionan son los de 10 a 12 mm.

Como agregado fino se emplea arena silíceo de río muy limpia y con un módulo de finura comprendido entre 3.0 y 3.1. La relación entre el agregado grueso y fino que mejores concretos da es la de 1.5 en peso.

La cantidad de agua empleada en estos concretos es reducida y en esto se basa principalmente, su alta resistencia. La relación agua cemento es siempre menor de 0.4 y frecuentemente por debajo de 0.30. Si se emplean adiciones activas como cenizas volantes o microsílíceo la relación agua/cemento + adición suelen ser del orden de 0.35.

La dosis de aditivo empleada suele ser de 3.0 a 5.0 veces superior que en los concretos tradicionales. Los aditivos empleados deben ser compatibles con el tipo de cemento utilizado y su eficacia estará de acuerdo con la composición química de éstos especialmente en cuanto a aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico se refiere.

Como adiciones se emplean cenizas volantes muy activas o microsílíceo o bien humo de sílice.

Estos concretos se aplican en reparaciones donde se precisan concretos de alta resistencia a compresión, alta impermeabilidad y gran resistencia frente a la abrasión.

Estos concretos, o mejor dicho morteros, se clasifican en tres tipos que son:

- Morteros de retracción controlada.
- Morteros de alta velocidad de fraguado.
- Morteros de alta resistencia inicial.

#### VI.4.1.1. Morteros de retracción controlada y expansivos

Son morteros que emplean cemento portland sin retracción o expansivo, que después de fraguar la mezcla se produce un aumento de volumen que compensa la retracción e, incluso, puede crear una expansión que genera compresiones en los concretos.

El efecto expansivo se debe a la formulación controlada en el cemento de sulfoaluminato cálcico o etringita. A veces es posible conseguir efectos expansivos mediante la incorporación a la masa de polvo de aluminio desengrasado o de óxido de hierro.

Existen en el mercado morteros expansivos preparados, suministrados en sacos o en bidones, que además poseen resistencias muy elevadas, son muy adecuados para el relleno de oquedades, la fijación de anclajes y restauración de recubrimientos de elementos de concreto armado dañados por corrosión (véase figura VI.1).

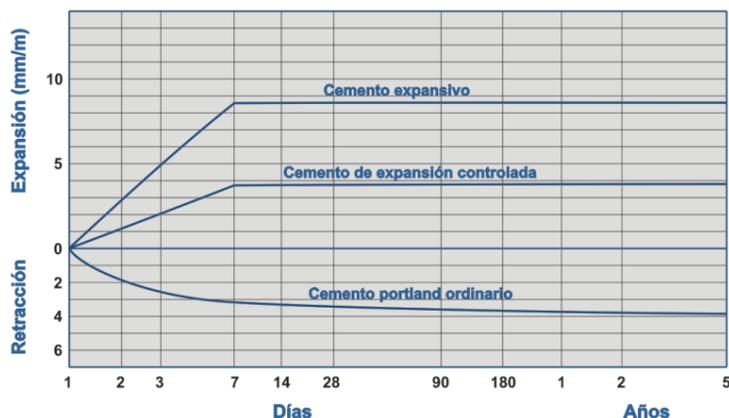


Figura VI.1. Concretos con retracción compensada.

#### VI.4.1.2. Morteros de alta velocidad de fraguado

Son morteros, y muchas veces pastas, formadas por la mezcla, en las proporciones adecuadas, de un cemento aluminoso y un cemento portland. De acuerdo con el porcentaje de cada uno de los cementos en la mezcla se tienen diferentes tiempos de principio y fin de fraguado, aunque dentro de zonas muy reducidas las características de la mezcla son muy sensibles a cualquier variación en las proporciones.

Este tipo de pasta o morteros de agregado fino (1 mm) se emplean perfectamente en reparaciones de vías de agua o de fallas donde se requiera una gran rapidez de rigidización del material de reparación.

#### VI.4.1.3. Morteros de alta resistencia inicial

En su formación entra un cemento magnesiano, es decir, formado principalmente por óxido de magnesio y fosfato amónico o de aluminio. En la hidratación de este cemento que es exotérmica se forma fosfato amónico magnésico hidratado desprendiéndose algo de amoníaco, lo que se aprecia fácilmente por su olor especialmente en locales cerrados. Cuando las temperaturas ambientes son altas se puede retrasar el fraguado mediante la adición de ácido bórico.

Los morteros, que suelen suministrarse envasados, constan del cemento, cenizas volantes y arena. El tiempo inicial de fraguado está comprendido entre los cinco y diez minutos y el final ocurre aproximadamente a los 30 minutos a temperatura de 20°C. La resistencia a la compresión a la hora de haberse mezclado suele alcanzar los 200 kg/cm<sup>2</sup>.

Estos morteros se trabajan muy bien con poca cantidad de agua, esto provoca que sean autonivelantes y, por consiguiente, exijan muy poca energía de compactación. Se emplean principalmente en parcheos y en reparaciones en donde sea preciso alcanzar resistencias altas muy rápidamente, no requiriendo el empleo de una imprimación adhesiva previa. El calor de hidratación es muy similar al de los morteros de cemento portland, lo que debe considerarse en las aplicaciones.



---

## VI.4.2. CONCRETO INYECTADO

Este concreto se puede considerar especial por su sistema de puesta en obra empleándose en aquellos casos donde se ha de colocar concreto en espacios muy reducidos, rellenando grandes oquedades, realizar recubrimientos superiores a 7.5 cm o cuando la zona a reparar se encuentre situada debajo de la superficie del agua.

El microconcreto empleado en la inyección suele estar formado, en peso, por dos partes de cemento portland, una de cenizas volantes o puzolanas naturales finamente molidas y de tres a cuatro partes de agregado fino con un tamaño máximo de 2.4 mm, y módulo de finura comprendido entre 1.7 y 3.0, así como del agua suficiente para lograr una fácil inyección. Es frecuente que se emplee también un aditivo fluidificante al cual se le incorpora una ligera cantidad de polvo de aluminio con el fin de lograr una expansión de la mezcla que tienda a rellenar mejor los espacios entre gránulos del agregado. El microconcreto se mezcla en una mezcladora de alta velocidad, que da lugar a una suspensión coloidal del cemento que facilita su puesta en obra y hace más eficaz su hidratación.

Estos concretos están caracterizados por su elevada densidad, impermeabilidad, carencia de segregación y retracción más reducida que los concretos tradicionales.

Los concretos inyectados son muy empleados en trabajos bajo el agua y en zonas de difícil acceso en trabajos de reparación de estructuras.

## VI.5. MATERIALES DE BASE ORGÁNICA

La base fundamental de estos materiales es un aglomerante o ligante de base de resinas o polímeros, generalmente, termoestables como resinas epóxicas, poliéster, poliuretanos, etc. Estas resinas polimerizan con un endurecedor, no precisando la presencia de agua en su endurecimiento.

Se pueden presentar como compuestos libres de agregados y cualquier tipo de cargas minerales y con viscosidades muy variables, y en forma de morteros, masillas, y en general, sistemas de formulaciones donde entren diferentes cargas para conseguir determinadas propiedades.

Las características son muy variables dependiendo de la resina base y del endurecedor empleado, así de las cargas que se hayan utilizado en la formulación del sistema o material.

### VI.5.1. LAS RESINAS EPÓXICAS

Son resinas de inyección con dos componentes que muestran buenas propiedades mecánicas. Sus propiedades físicas y químicas varían mucho. Un gran número de resinas epóxicas tienen el inconveniente de no ser utilizables en los apoyos húmedos, o de serlo sólo de manera limitada, pues tienen mala adherencia. Las resinas epóxicas se aconsejan, entre otros casos, cuando se exige uno o varias de las propiedades siguientes:

- Alta resistencia al arrancamiento.
- Alta resistencia a la tensión.
- Alta resistencia a la compresión.
- Alta resistencia a la tensión por flexión.

Es igualmente útil la buena resistencia a los productos químicos; únicamente en presencia de ácidos fuertes su resistencia puede constituir un problema.

Los sistemas a base de resinas epóxicas usualmente no son suaves, o lo son en cierta medida. Es por eso que están indicados para el sellado solidificado o para el pegado rígido de fisuras. Las resinas epóxicas suavizadas muestran una gran resistencia a la tensión por flexión. Ellas soportan sacudidas o ligeros movimientos sin desprenderse de los flancos o labios de las fisuras.

### **VI.5.2. RESINAS SINTÉTICAS**

Las resinas sintéticas son compuestos poliméricos derivados del petróleo y en cuya composición entran, fundamentalmente, carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno.

Las resinas termoplásticas se emplean en el campo de las reparaciones y refuerzos en forma de emulsiones o látex mezcladas con morteros o concretos tradicionales y, por lo tanto, dentro del grupo de materiales de base mixta. Las principales resinas empleadas en emulsiones son las estireno-butabieno, acetato de polivinilo, acrilamidas y las acrílicas.

Las resinas termoendurecedoras son muy utilizadas en reparaciones y refuerzos y se caracterizan por su buena resistencia mecánica y su gran adherencia frente a determinados materiales. Las resinas no tendrían aplicación práctica si no se emplean aisladamente en la construcción, por tal motivo deben formarse formulaciones donde entren diversos componentes. De estos componentes, unos son totalmente necesarios, como son los endurecedores y catalizadores con los que las resinas reaccionan para convertirse en polímeros formados por grandes cadenas entrecruzadas que dan lugar a un sólido resistente y estable; otros se emplean para modificar algunas de las características del producto solidificado como su coeficiente de dilatación térmica, su módulo de elasticidad, su tixotropía, etc.

Las principales resinas sintéticas termoendurecedoras que emplean en construcción y concretamente en trabajos de reparación son termoestables, de las cuales se deben destacar las epoxi, las de poliuretano, las de poliéster insaturado y las acrílicas reactivas.

Las formulaciones de resinas sintéticas se emplean algunas veces como adhesivos y pinturas protectoras, otras mezcladas con agregados formando morteros y concretos, otras mezcladas con otros componentes para formar masillas usadas en trabajos de reparación y otras emulsionadas con agua dando lugar a látex. Las resinas epoxi son las más utilizadas como consecuencia de su gran adherencia frente al concreto, piedra, cerámica, acero, etc.

En trabajos de inyección de fisuras y unión de concretos de diferente edad y de concreto con acero, las resinas más utilizadas son las epoxi o epoxídicas; en pinturas protectoras de concreto con la finalidad de reducir su permeabilidad se emplean las epoxi, las de poliuretano y las acrílicas; en la confección de morteros y concretos se emplean preferentemente resinas epoxi, acrílicas y poliéster.

### **VI.5.3. LOS POLIURETANOS**

En el mercado se encuentran poliuretanos en forma de sistemas de uno o dos componentes. Se han utilizado desde hace más de 20 años. Según los estudios hechos en laboratorios, su durabilidad sobrepasa los 40 años, inclusive en un medio fuertemente básico (pH de 13.5).

Los poliuretanos son convenientes para inyecciones de fisuras, principalmente debido a las propiedades siguientes:

- Elevada fuerza de adherencia, inclusive sobre apoyos húmedos.



- Poder de penetración elevado debido a la débil viscosidad.
- Buena deformabilidad en el caso de movimiento de fisuras.

La elasticidad de numerosas resinas de poliuretano utilizadas para una imprimación durable es generalmente de menos del 10%. Concretamente, eso significa que su límite de elasticidad se logra cuando el ancho de las fisuras cambian para pasar de 0.30 a 0.33 mm.

En presencia de agua sometida a presión, las espumas de poliuretano permiten una imprimación temporal rápida, que debe completarse de inmediato con una imprimación durable.

#### VI.5.4. LOS POLIMETACRILATOS

Las resinas a base de polimetacrilatos para inyecciones son productos resistentes que reaccionan de modo completamente diferente a las resinas epóxicas o de poliuretano. Para las inyecciones en fisuras, interesan sobre todo las propiedades siguientes:

- Débil viscosidad y buena humectabilidad, de donde resulta un alto poder de penetración.
- Viscosidad constante hasta el fin del tiempo de su utilización (de diez segundos a un mes según la formulación).
- Nada de dosificación precisa necesaria, pues sólo las moléculas de una sustancia reaccionan juntas (desencadenadas por estimulantes, calor o radiación).

Los polimetacrilatos pueden formularse tanto para el sellado mediante adherencia resistente (resistencia a la tensión por flexión de aproximadamente  $15 \text{ N/mm}^2$ , resistencias a la compresión de hasta  $30 \text{ N/mm}^2$ ), como para impermeabilización de fisuras. Las resinas polimetacrilato son interesantes debido a su elasticidad, que les permite no perder su efecto impermeabilizante en caso de deformación de las fisuras. Y como se hinchan al contacto del agua, este efecto aumenta más. Pero en el mercado también se encuentran sistemas duros que no se hinchan.

#### VI.5.5. RESINAS ACRÍLICAS

Las formulaciones de resinas acrílicas cuando endurecen dan lugar a polímeros de resistencias parecidas a las resinas de poliéster.

Estas resinas son muy fluidas con lo cual permiten dosis de cargas más elevadas que las resinas de poliéster ocasionando que su retracción de curado sea muy inferior a las de éstas.

Las resinas acrílicas pueden emplearse solas o mezcladas con otros monómeros como puede ser el metacrilato de alilo. En general, muchas de las mezclas que se forman con otros monómeros buscan mejorar las propiedades de la formulación como por ejemplo, hacer que está posea un módulo de elasticidad más bajo y, por lo tanto, absorban las deformaciones que se produzcan por la retracción sin crear tensiones indeseables que pueden hacer peligrar la adherencia con el concreto.

Las resinas acrílicas son muy resistentes a la acción de los rayos ultravioleta no modificando el color ni transparencia de los barnices.

Las combinaciones estireno-acrilato presentan síntomas de envejecimiento, al poco tiempo de estar expuestas a la acción de los rayos ultravioleta, por lo que son recomendables sólo en interiores.

### **VI.5.6. EMULSIONES DE POLÍMEROS**

Desde la década de 1950 se emplean polímeros que se añaden a los morteros o concretos de cemento usados en reparaciones para mejorar algunas de sus características. Los polímeros se suministran emulsionados en agua formando un compuesto lechoso de color blanco denominada látex. El agua de látex puede sustituir total o parcialmente al agua de mezcla utilizada en el mortero o concreto.

El látex actúa sobre los morteros o concretos de la siguiente forma:

- Como plastificante reduciendo, por lo tanto, el agua de mezcla, dando muy buena trabajabilidad a las mezclas y menor retracción.
- Mejorando la adherencia entre el mortero de reparación y el reparado.
- Mejorando la resistencia al impacto.
- Reduciendo la permeabilidad de los morteros al agua, aceites, etc., aumentando la resistencia frente a las agresiones químicas.
- Creando una película que impida la evaporación del agua y, por consiguiente, contribuya al curado.

Las emulsiones de polímeros empleadas como modificadores incluyen el acetato de polivinilo, al estireno butadieno, al cloruro de polivinilo, a los acrílicos modificados y a los epoxídicas.

El acetato de polivinilo no debe emplearse en reparaciones que estén en contacto con el ambiente atmosférico debido a que la humedad alcalina termina por descomponerlo.

El cloruro de polivinilo no es adecuado para su empleo en morteros o concretos de reparación, pues con el tiempo los cloruros libres que posea pueden generar problemas de corrosión de armaduras.

Los látex de estireno butadieno, los acrílicos y los acrílicos modificados son los más empleados en morteros y concretos para trabajos de reparación, no hay gran diferencia en el comportamiento de los tres, sin embargo, algunos acrílicos presentan problemas en aplicación en suelos industriales donde hay derrames de aceites, grasas y algunos productos químicos, siendo también sensibles a la acción de los rayos ultravioleta.

Los látex epoxi son menos frecuentes y se emplean para modificar las propiedades de los morteros y concretos tradicionales y proyectados, proporcionan a las mezclas altas resistencias a la abrasión, a la penetración de sales y ciclos de hielo-deshielo; al tiempo que mejoran las resistencias a la tracción y flexión de las mismas.

Con el látex epoxi se puede trabajar con relaciones agua/cemento de 0.28 a 0.32 con consistencias de 10 a 15 cm. Las resistencias alcanzadas a compresión son de 600 kg/cm<sup>2</sup>. Los látex pueden emplearse mezclándolos directamente en obra con los restantes componentes del mortero o concreto o bien usando compuestos previamente dosificados y preparados que únicamente hay que mezclarlos con agua en el momento de su aplicación en reparaciones.



Los morteros modificados con polímeros se utilizan principalmente en la reparación de concreto armado, que han perdido o tienen dañados los recubrimientos por efecto de corrosión tanto del concreto como de las armaduras y donde se empleen espesores comprendidos entre los 12 y los 30 mm, así como en revestimientos de pisos industriales dañados.

## VI.6.MATERIALES DE BASE MIXTA

Son materiales que tienen por base cementos inorgánicos, generalmente portland y polímeros, normalmente termoplásticos. Las resinas que entran en su composición suelen ser acrílicas, estireno-butadieno, acetato de polivinilo o acrílicas o bien emulsiones de resinas especiales.

Los morteros y concretos tradicionales son el material más utilizado en trabajos de reparación y refuerzo de elementos estructurales como recrecidos, sustitución de concreto dañado por uno nuevo, parcheos, etc.

En estos trabajos muchas veces se hace uso, para mejorar la adherencia del concreto de refuerzo, de resinas epoxi o de emulsiones de polímeros (látex) aplicados sobre las superficies previamente preparadas del concreto existente o en el concreto de reparación.

### VI.6.1. RESINAS EPOXI

Las resinas epoxi son las más empleadas en la construcción. Una formulación básica es la formada por una resina epoxi y un endurecedor o agente de curado. La resina epoxi más empleada está formada por una combinación de epoclorhidrina y bisfenol, siendo el endurecedor aminas, poliamidas, amidas, versamidas, fenoles, alcoholes, etc., o moléculas que posean hidrógenos activos.

Dadas sus buenas características las formulaciones epoxi pueden emplearse en trabajos de reparación, refuerzo y protección de estructuras de concreto que pueden ser atacadas por agentes agresivos físicos, químicos o biológicos.

Las formulaciones epoxi se emplean puras, es decir, sin cargas de ningún tipo, en forma de morteros o concretos si llevan adicionado agregado fino o grueso, de masillas si les adicionan cargas determinadas a mejorar su tixotropía y otras características y de emulsiones en agua para adicionar al concreto de cemento portland.

Las principales aplicaciones en el campo de los refuerzos de estructuras son los siguientes:

- Inyección de fisuras en el concreto.
- Unión de concreto nuevo con concreto existente en reparaciones de elementos estructurales.
- Unión de bandas metálicas de acero a concreto existente en refuerzos de vigas y losas.
- Morteros epoxi para rellenos de grietas y oquedades, trabajos de parcheo y suelos industriales.
- Concretos epoxi para rellenos de grandes oquedades.
- Revestimientos anticorrosivos, sellantes o impermeabilizantes.

- Emulsiones para mezclar con morteros y concretos de cemento portland.

Las características de las formulaciones epoxi que hacen posible estas aplicaciones se pueden resumir en las siguientes:

- Retracción muy pequeña y prácticamente despreciable.
- Retracción térmica de polimerización muy pequeña en capas delgadas.
- Actividad regulable dentro de amplios márgenes.
- Compatibilidad con el agua (formulaciones especiales).
- Adherencia excelente frente al acero, concreto, piedra y otros materiales de construcción.
- Excelentes características mecánicas.
- Su red reticular es totalmente estable frente a la intemperie y a la mayoría de los medios agresivos.
- Capacidad de poder formar redes reticuladas flexibles.

Las formulaciones epoxi formadas por una resina y un endurecedor son las empleadas en la inyección de fisuras y grietas con el fin de devolver el monolitismo o de sellar al concreto.

Asimismo, este tipo de formulación es el empleado en la unión de concreto y en algunos revestimientos sellantes protectores del concreto. Las formulaciones formadas por resinas, endurecedor y cargas como pueden ser calizas, síliceo, betonita, alumina, amianto, etc., se emplean en masillas adhesivas para la unión de acero a concreto o en masillas sellantes. Los morteros y concretos epoxi se utilizan en trabajos de reparación en donde se exigen grandes resistencias mecánicas y rápida puesta en servicio del material o el elemento.

En toda formulación se debe indicar además de sus características químicas y físicas su «pot life» que es el tiempo abierto de aplicación y su tiempo de curado, es decir, el tiempo que transcurre desde el momento de la mezcla de la resina y en endurecedor en el recipiente y el momento en que esta mezcla deja de ser aplicable por producirse una rápida reacción de los componentes en el mismo recipiente donde se ha mezclado. Este tiempo varía con la reactividad de la formulación, con la temperatura y con la capacidad del recipiente, oscilando entre 30 minutos y 48 horas.

Dado que las formulaciones pueden disipar mejor el calor de su reacción exotérmica cuando están aplicadas en capas delgadas sobre una superficie que cuando están encerradas en un recipiente se comprende que el tiempo abierto será mayor que el «pot life» aunque éste será dependiente de la temperatura ambiente.

El tiempo de curado es el tiempo transcurrido desde que se aplica la formulación hasta que endurece totalmente. Este tiempo es variables con la reactividad de la formulación y con la temperatura ambiente, pues cuanto más baja sea ésta mayor será el tiempo de curado, dándose el caso de que la mayoría de las formulaciones por debajo de 5°C, no suelen endurecer. Algunas formulaciones especiales curan a temperaturas próximas a 0°C. La velocidad de curado se duplica por cada 10°C de elevación de la temperatura.



## VI.6.2. RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO

Las resinas de poliéster son también derivados del petróleo y para su aplicación precisan de un endurecedor o catalizador, generalmente, peróxido de benzoilo. Las proporciones como se mezclen ambos componentes no tienen que ser tan precisas como en el caso de las resinas epoxi, aunque el tiempo de curado y la adhesividad sobre determinados materiales se ve influida por la falta de precisión en la dosificación.

Estas resinas pueden mezclarse con cargas como caliza, silicio, cemento portland, o con agregado fino para formar morteros que poseen una buena adherencia con el concreto, impermeabilidad y características mecánicas y de resistencia a los agentes químicos muy buenas, pero desgraciadamente estas resinas desarrollan la mayor parte de su exotermicidad cuando han solidificado, lo cual al enfriarse produce una contracción térmica tan importante que hace peligrar la adherencia con el concreto.

A la retracción anterior se debe añadir la que tiene lugar por reducción de volumen durante la polimerización. El coeficiente de dilatación térmica de las formulaciones endurecidas es muy elevado y así, en los morteros de poliéster es de  $25 \times 10^{-6}$  a  $35 \times 10^{-6}$  m/m °C, frente a  $9 \times 10^{-6}$  m/m °C, que presentan los morteros de cemento portland, lo que debe ser también un problema en el caso de variaciones térmicas importantes.

Todos los inconvenientes anteriores hacen que las resinas de poliéster sólo deban emplearse en reparaciones de zonas muy pequeñas y de reducido espesor, aunque se hayan realizado aplicaciones sobre bases de concreto con superficies muy bien preparadas, de morteros de poliéster de hasta 5 mm de espesor en pavimentos resistentes a agresiones químicas.

## VI.7. PRODUCTOS PARA LA SILICATACIÓN

Por silicatación de superficie del concreto se entiende, una serie de procedimientos similares, que tienen por objeto tapar los poros superficiales y endurecer las superficies del concreto o mortero de pisos y contrapisos, impermeabilizándolos. Pueden también ser aplicados en superficies verticales, impermeabilizándolas y protegiéndolas. Los siguientes productos pueden ser usados para la silicatación del concreto:

### VI.7.1. METASILICATO DE SODIO O POTASIO

Es un tratamiento que consiste en esparcir una solución de metasilicato de sodio o potasio diluidos, sobre la superficie de concreto. Estos reaccionan con la cal, formándose un gel de ácido silícico que contiene gran cantidad de agua. Este ácido obstruye los poros y, después de seco, forma una capa "esmalada" de 1 a 2 mm de espesor. Generalmente se encuentra en el mercado con una concentración de 40% y debe ser diluido con una relación de una parte de silicato en 4 partes de agua. Se emplea de dos a cuatro manos, siempre esperando un secado ligero de la mano anterior. El esparcimiento generalmente se hace con escoba, rodillos y/o cepillos. La primera mano debe ser más diluida.

### VI.7.2. TETRAFLORURO DE SILICIO

Es un tratamiento donde la superficie del concreto es sometida a la acción del tetrafloruro de silicio que, en reacción con los silicatos y aluminatos hidratados, da origen al fluoruro de calcio y a los hidratos de silicio y alúmina. Los hidratos obstruyen los poros, mientras el fluoruro de calcio, además de colaborar a esa obstrucción, posee buena resistencia química, formando una capa superficial impermeable y protectora.

### VI.7.3. FLUOR SILICATO DE MAGNESIO O DE ZINC

Conocidos como endurecedores superficiales de piso.

Son recomendables tres manos. La primera a base de 1 kg de cristales de fluorsilicato en 8 litros de agua. La segunda y la tercera mano deben tener una dosificación de 1 kg de cristales de fluorsilicato en 4 litros de agua potable. Las manos deben ser aplicadas con el auxilio de pinceles y brochas en superficies verticales y rodillos y escobas en las horizontales. Se recomienda esperar cerca de tres horas o más entre las manos para asegurar que haya adecuada absorción, reacción y secado de la mano anterior.

Estos tratamientos deben ser usados con cautela porque pueden reducir o impedir la adherencia de pinturas y revestimientos posteriores, así como no proteger la estructura contra los ataques químicos intensos.

### VI.8.ACEITES

Los aceites de soya, aceite de peroba y ciertos ácidos como aléico, que contienen consistencia aceitosa, pueden ser usados para la impermeabilización y protección de superficies de concreto. En general oscurece la superficie de concreto. En el momento de la aplicación, el concreto debe tener más de 14 días de fabricación y se recomienda neutralizar previamente la superficie antes de la aplicación, usando una solución compuesta de 2.4 kg de cloruro de zinc con 3.8 kg de ácido fosfórico en 100 litros de agua potable. Esperar el sacado por 48 horas, antes de la aplicación de los aceites, recomendándose por lo menos dos manos espaciadas más de 24 horas.

Como está solución de neutralización es ácida, no es recomendable en estructuras de concreto pretensado ni en casos de poco recubrimiento del acero de refuerzo. Así como la silicatación, los aceites deben ser usados con cautela, porque impiden la adherencia de nuevos recubrimientos y no protegen la estructura contra ataque químicos intensos.

### VI.9.ALGUNAS SUSTANCIAS COMUNES QUE SON UTILIZADAS PARA LA LIMPIEZA O TRATAMIENTO PREVIO

Productos químicos	Otras designaciones	Clases de toxicidad	Clases de contaminación de las aguas
Acetato de metileno	Ester metilacético	3	1
Acetona		5	0
Ácido acético		3	
Ácido muriático		≤1%: 5; 1-3%: 4; 3-10%: 3; >10%: 2	1
Ácido oxílico		2	1
Ácido fosfórico		≤5%: 5; 5-10%: 4; 10-20%: 3 >20%: 2	1
Amoniaco (soluciones acuosas)	Hidróxido de amonio	1-12.5%: 2; >12.5%: 3	2
Cloroformo	Triclorometano	1*	2
Cloruro de aluminio		3	1
Cloruro de amonio	Sal de amoniaco	4	
Cloruro de etileno	1,2-Dicloroetano	1*	2
Cloruro de metileno	Diclorometano	4	2
Citrato de sodio		Libre	0
Agua de javel	Solución de hipoclorito de sodio	≤2.5%: 5; 2.5-10%: 4 >10%: 3	
Etanol	Alcohol; alcohol etílico	Libre	



Productos químicos	Otras designaciones	Clases de toxicidad	Clases de contaminación de las aguas
Glicerina		Libre	0
Hidróxido de sodio		2	1
Isopropanol	Alcohol isopropílico 2-propanol	Libre	1
Keroseno	Petróleo claro	5	1
Metanol	Alcohol metílico	3	1
Nitrato de sodio		4	1
Ortofosfato de sodio	Fosfato trisódico	5	1
Peroxidato de metaborato de sodio		1*	3
Peróxido de sodio		2	
Peróxido de hidrógeno	Agua oxigenada	≤5%: 5; 5-20%: 4; 20-35%: 3; >35%: 2.	0
Sosa cáustica		≤1%: 4; 1-5%: 3; >5%: 2.	
Sulfóxido dimetílico		Libre	
Sulfuro de carbono		1	2
Tetracloruro de carbono		1*	3
Tiosulfato de sodio		4	0
Tolueno		4	2
Tricloretano	Cloretano	5	3
Tricloretileno		4	3
Xileno		4	2

Clases de toxicidad	
1*	Sustancias extremadamente tóxicas con potencial cancerígeno, teratógeno o mutágeno.
1	Sustancias extremadamente tóxicas.
2	Sustancias muy tóxicas.
3	Sustancias tóxicas
4	Sustancias que presentan cierto peligro.
5	Sustancias débilmente tóxicas
Libre	Sustancias fuera de las clasificadas como tóxicas.

Clases de contaminación de las aguas	
0	Sustancias que generalmente no contaminan las aguas.
1	Sustancias que contaminan débilmente las aguas.
2	Sustancias que contaminan las aguas.
3	Sustancias que contaminan fuertemente las aguas.

Tablas VI.1. Algunas sustancias comunes que son utilizadas para limpieza o tratamiento previo.

## VI.10. CONCLUSIÓN

En el mercado existe una gran variedad de materiales de reparación de estructuras de concreto, cada uno de éstos se debe aplicar para un caso particular, utilizando la técnica recomendada por el fabricante.

A pesar de que en este capítulo se mencionan sólo los materiales más comúnmente empleados en reparaciones, debemos tener en cuenta, que el mercado ofrece una más completa gama de materiales y cada día los fabricantes secan nuevos productos. Sin embargo, esto no siempre significa que sean mejores que los que existen, por tal motivo debemos emplearlos con moderación, sobre todo si no conocemos las propiedades y características que inferirán éstos al elemento a reparar, ya pueden derivar en más que beneficios, en nuevos y más graves daños al elemento.

---

Además, muchas de los materiales utilizados para reparación requieren de mano de obra especializada, lo cual significa un aumento del costo de reparación, sobre todo en amplias zonas a reparar.

En la elección del material de reparación debemos tomar en cuenta una serie de aspectos, como son: compatibilidad con los componentes del concreto, sollicitaciones mecánicas, físicas, químicas a que estarán expuestas, extensión y grado del daño, lugar de aplicación, espesor de la capa a aplicar y el tiempo de aplicación.

Los materiales empleados en reparaciones de concreto, se clasifican en: materiales de base inorgánica, materiales de base orgánica y materiales de base mixta. Los materiales de base inorgánica, la base fundamental que constituye éstos es el cemento, sea Portland o no. Los materiales de base inorgánica están constituidos a base de aglomerantes o ligante a base de resinas o polímeros, las cuales utilizan un endurecedor para polimerizarlas. Mientras que los materiales de base mixta, están constituidos tanto de cemento como aglomerante, las cuales le confieren las propiedades de los materiales inorgánicos como orgánicos.

Pero también no debemos olvidar las armaduras de acero, las cuales también puede servir como material de reparación, principalmente para sollicitaciones mecánicas.



---

## **CAPÍTULO VII**

### **ALGUNAS TÉCNICAS DE REPARACIÓN**

#### **VII.1. INTRODUCCIÓN**

La elección del sistema de reparación y protección adecuado está influenciado por el costo-beneficio que reportará al propietario.

Técnicamente, la solución escogida debe garantizar, como mínimo, la seguridad estructural de la obra y la durabilidad a través del tiempo, siempre se evitarán soluciones complicadas a no ser que se requiera aumentar la capacidad portante.

En el proceso de reparación se escogerán preferentemente medios auxiliares ligeros buscando no incidir en el aumento de carga viva o muerta sobre la obra. También se evitará el uso de medios auxiliares anclados que vayan a aumentar localmente la carga o a dejar puntos vulnerables a un nuevo ataque. Cada técnica de reparación de una superficie ofrece ventajas y limitaciones, dependiendo de las condiciones específicas del proyecto de reparación.

Económicamente, la reparación y protección de la obra debe estar en relación con la vida útil residual esperada a partir de la inversión.

El ajuste de una solución o soluciones debe ir acorde con la vida útil esperada de la obra, nunca optando por soluciones que garanticen la supervivencia más allá de lo necesario.

El plazo de ejecución irá acorde con el tiempo que pueda estar fuera de servicio la obra, esto económicamente influye debido al lucro cesante causado y será decisivo a la hora de escoger las soluciones de saneado, reparación y protección.

#### **VII.2. TRABAJOS DE SANEAMIENTO**

Los trabajos de saneamiento de los daños causados al concreto incluyen:

- La preparación del soporte del concreto.
- Tratamiento preliminar y protección contra la corrosión del acero de refuerzo.
- Reperfilado y remodelado del concreto mediante mortero.
- Protección o recubrimiento.

Independientemente de la elección del producto adecuado, el sistema de reparación o de saneamiento es de vital importancia. Para que estas medidas de saneamiento no sean sólo un “remiendo” o de maquillaje del trabajo a de confiarse a personal competente con experiencia en el uso de los productos utilizados y equipos adecuados al trabajo.



### VII.2.1. PREPARACIÓN DEL SOPORTE DEL CONCRETO

Para determinar el método más ventajoso para el tratamiento previo del soporte, tanto técnica como económicamente, pueden ser útiles algunas comprobaciones de la superficie:

- a) Al pasar la mano sobre la superficie podemos verificar si el concreto suelta polvo o arena.
- b) Al golpear la superficie de concreto con un martillo se consiguen indicaciones respecto a su solidez. Un sonido claro indica que se trata de un concreto sólido. Un sonido apagado indica un concreto quebradizo. Cavidades situadas bajo zonas antiguamente tratadas en el concreto o sobre acero oxidado dan un sonido amortiguado.
- c) Al frotar el martillo en la superficie del concreto se puede detectar por el sonido la existencia de capas finas de mortero, lechadas o revestimientos mal adheridos.
- d) Rascando con un cuchillo o desarmador es posible desprender partes disgregadas blandas de la superficie del concreto. Cuando se trata de capas de lechadas o morteros de baja resistencia se producen rayas fácilmente reconocibles.
- e) Rociando la superficie del concreto con agua se puede comprobar suficientes indicios: tras la prueba de rascado, pueden aparecer zonas que absorben más débilmente el agua y que brillan, mientras que las rayas provocadas, por el contrario, absorben el agua más rápidamente.

Unas fisuras en la superficie del concreto retienen durante más tiempo la humedad y aparecen más oscuras que las zonas circundantes. Cuando el agua forma perlas o estrías es la prueba de que existen restos de descimbrantes o de productos de curado, lo que indica en estos casos la disminución de la adherencia al soporte.

De modo general, la porosidad y la permeabilidad pueden determinarse:

- a) La existencia de humedad o infiltración de agua a través del concreto, se comprueba colocando encima y pegando sólidamente en sus bordes un pedazo de plástico (polietileno), si debajo de ésta aparece agua es debido a condensaciones.
- b) Colocando y apoyando con fuerza una cinta adhesiva en la superficie se puede determinar al arrancarla si el soporte presenta una adherencia demasiado débil, lo cual se manifiesta por elementos que permanecen pegados a la cinta.

### VII.2.2. MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO PREVIO

En función del resultado de los exámenes y controles indicados anteriormente, el tratamiento preliminar de la superficie del concreto permite alcanzar los siguientes fines:

- a) Eliminación de todas las partes sueltas, quebradizas o disgregadas que no se encuentren suficientemente adheridas al soporte del concreto.
- b) Eliminación de todas las zonas débiles que no resisten las tensiones, debidas a la tracción del material de reparación previsto a los que producen por contracciones debidas a variaciones de temperatura.

- c) Eliminación de suciedad, aceites, grasas o restos de pintura o de cualquier material que influya negativamente en la adherencia del concreto.
- d) Eliminación del concreto que contenga una elevada concentración de productos nocivos que representan un peligro para la protección del acero de refuerzo contra la corrosión.
- e) Poner al descubierto acero de refuerzo oxidado para que pueda ser tratado adecuadamente.

Los métodos más frecuentemente utilizados para la limpieza o tratamientos previos son los siguientes:

- Chorro de agua.
- Chorro de agua a alta presión.
- Chorro de agua mezclado con arena de cuarzo.
- Chorro de llamas.
- Fresado o escarificado mecánico.

Otros procedimientos

- Chorro de aire para superficies pequeñas.
- Chorro de vapor para impurezas de origen atmosférico.
- Ácido, poco recomendable.

### **VII.2.3. POSIBILIDADES DE SANEAMIENTO**

Una vez que se ha decidido por la reparación, su objetivo debe definirse claramente. Se tomarán en cuenta la amplitud de las medidas de reparación y los medios financieros que fueran necesarios. El fin que se persigue con una reparación es el restablecimiento del estado inicial y la prevención de cualquier nuevo daño, tal objetivo sólo puede alcanzarse mediante una reparación completa y sin dejar ningún detalle suelto.

### **VII.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO**

Los procedimientos de limpieza y preparación del sustrato son tan importantes que comprometen íntegramente una reparación o refuerzo, independientemente de la calidad e idoneidad de los materiales y sistemas que se utilicen.

La preparación del sustrato es entendida como un conjunto de procedimientos realizados antes de la limpieza superficial y de la aplicación de los materiales y productos de corrección, o sea son los tratamientos previos de la superficie de los elementos estructurales.

La tabla VII.1 reúne los procedimientos de preparación del sustrato.



Procedimiento	Procedimiento más adecuado para			
	Concreto con superficie		Acero con superficie	
	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda
Escarificación manual	Adecuado	Adecuado	Inadecuado	Inadecuado
Disco de desbaste	Aceptable	Adecuado	Aceptable	Aceptable
Escarificación mecánica	Adecuado	Adecuado	Inadecuado	Inadecuado
Demolición	Adecuado	Adecuado	Inadecuado	Inadecuado
Lijado manual	Inadecuado	Aceptable	Adecuado	Aceptable
Lijado eléctrico	Adecuado	Aceptable	Adecuado	Aceptable
Cepillado manual	Adecuado	Aceptable	Adecuado	Aceptable
Pistola de aguja	Inadecuado	Inadecuado	Adecuado	Adecuado
Chorro de arena, seca o húmeda	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Aceptable
Disco de corte	Aceptable	Adecuado	Adecuado	Adecuado
Quema controlada	Adecuado	Inadecuado	Adecuado	Adecuado
Remoción de aceites y grasas impregnadas	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado	Adecuado
Máquina de desgaste superficial	Aceptable	Adecuado	Inadecuado	Inadecuado

Tabla VII.1. Procedimiento de preparación del sustrato.

### VII.3.1. ESCARIFICACIÓN MANUAL

El procedimiento de escarificación manual consiste en golpear la superficie con ayuda de cincel y mazo, para retirar todo el material suelto, mal compactado y segregado hasta llegar al concreto sano, obteniendo una superficie rugosa y cohesiva, que propicie buenas condiciones de adherencia, evitando los golpes que puedan astillar las aristas y contornos de la región de que se trate. Se debe prever apuntalamiento adecuado, cuando se considere necesario (véase figura VII.1).

Este procedimiento es utilizado para preparar pequeñas superficies y en sitio o lugares de difícil acceso.

Una vez escarificada la zona, es necesario efectuar una limpieza con aire comprimido para remover el polvo.

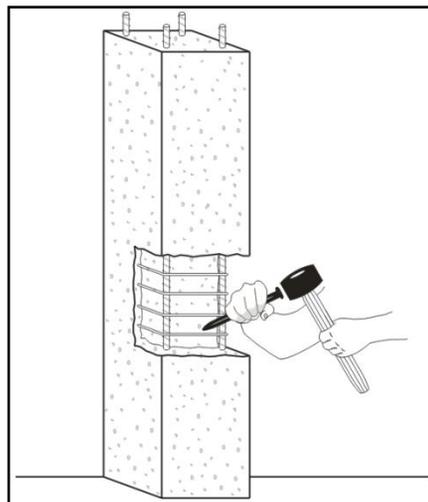
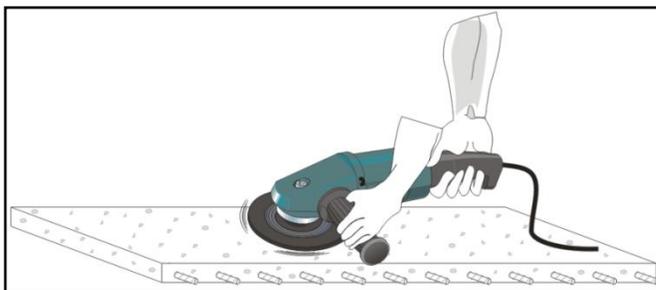


Figura VII.1. Escarificación manual del sustrato.

### **VII.3.2. DISCO DE DESBASTE**

El procedimiento de preparación del sustrato por este método consiste en lijar la superficie aprovechando el peso propio de la pulidora industrial. Efectuar el desbaste en capas o pasadas cruzadas a 90°. Debastando, cada vez, un espesor pequeño, manteniendo la uniformidad del espesor en toda la superficie (véase figura VII.2).

Este procedimiento es utilizado para preparar y devastar grandes superficies. Por este método se obtienen una alta productividad de preparación del sustrato, sin embargo, requiere de mano de obra especializada.



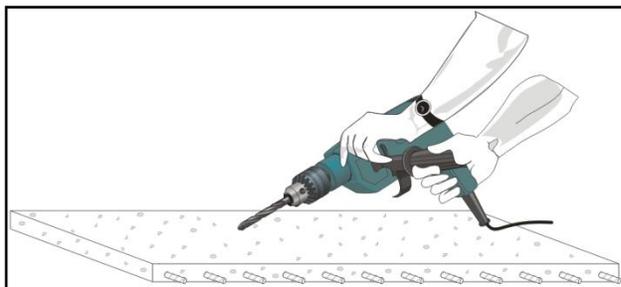
**Figura VII.2.** Disco de desbaste.

### **VII.3.3. ESCARIFICACIÓN MECÁNICA**

El procedimiento de esscarificación mecánica consiste en remover la nata superficial y procurar crear la rugosidad debida en el concreto con ayuda de la máquina de desbaste, para retirar todo el material suelto, mal compactado y segregado hasta llegar al concreto sano, obteniendo una superficie rugosa y cohesiva, que propicie buenas condiciones de adherencia, evitando los golpes que puedan astillar las aristas y contornos de la región de que se trate. Se debe prever apuntalamiento adecuado, cuando se considere necesario (véase figura VII.3).

Este procedimiento es utilizado para preparar grandes superficies y repicado.

Una vez esscarificada la zona, es necesario efectuar una limpieza con aire comprimido para remover el polvo.



**Figura VII.3.** Escarificación mecánica.

#### VII.3.4. DEMOLICIÓN

El procedimiento de preparación del sustrato por este método consiste en retirar todo el material suelto mal compactado y segregado hasta llegar el concreto sano utilizando un martillo neumático (20 kg) o electromecánico. Se debe prever apuntalamiento adecuado, cuando se considere necesario (véase figura VII.4).

Este procedimiento es utilizado para preparar grandes superficies y demolición, por lo cual requiere de mano de obra especializada para no comprometer la estructura existente. Este tipo de método no es adecuado para elementos estructurales esbeltos.

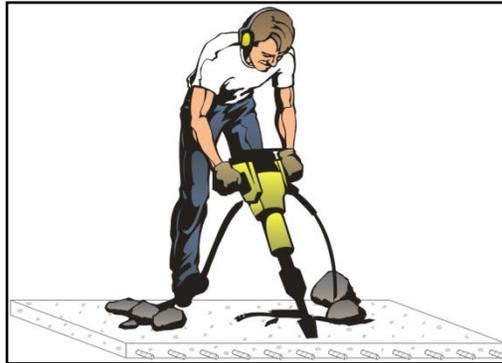


Figura VII.4. Demolición.

#### VII.3.5. LIJADO MANUAL

El equipo utilizado en este método de preparación del sustrato es lija de agua para concreto o lija de hierro para acero. El procedimiento consiste en pasar la lija en movimientos circulares y enérgicos sobre la superficie. En el caso del acero de refuerzo intentar obtener un color metálico, denominado estado de «metal casi blanco», que consiste en que toda capa de óxido de laminación y los productos de la corrosión deberán ser removidos, de modo que el metal apenas presente pequeñas manchas en la superficie, con lo cual deberá estar libre de residuos visibles y presentar color gris claro (véase figura VII.5).

Este procedimiento es utilizado en pequeñas superficies de concreto, y lijado de barras de refuerzo. Sin embargo, requiere un control cuidadoso, principalmente al momento del lijado de las barras de refuerzo.

#### VII.3.6. LIJADO ELECTRÓNICO

El procedimiento de lijado electrónico consiste en remover impurezas existentes en la superficie de concreto, abre y limpia los poros. Remueve la capa de óxido de laminación y la costra de corrosión superficial de las placas metálicas. Permite remover las eflorescencias y regular la superficie de concreto. El lijado electrónico se lleva a cabo con un lijador electrónico, y los movimientos se hacen en forma circular procurando mantener la máquina paralela a la superficie.

Este procedimiento es utilizado para preparar grandes superficies y placas de acero. Sin embargo, con este procedimiento se produce gran cantidad de polvo por lo cual el personal requiere máscaras antipolvo.

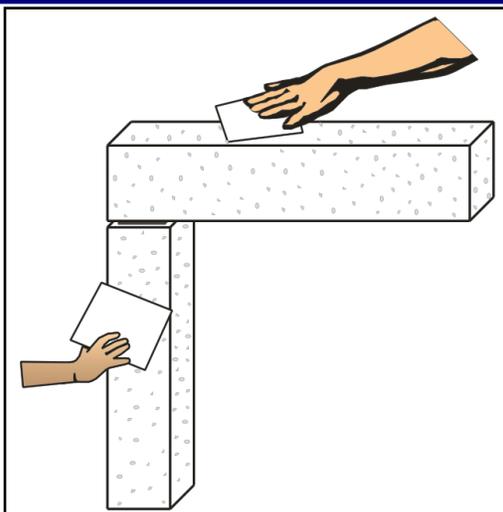


Figura VII.5. Lijado manual.

### VII.3.7. CEPILLADO MANUAL

Este método de preparación del sustrato es utilizado para preparar superficies de concreto de pequeñas dimensiones y de fácil acceso, además de la remoción de la corrosión en acero de refuerzo. El procedimiento es cepillar hasta la completa remoción de partículas sueltas o cualquier material indeseable, para lo cual se usa el cepillo de cerdas de acero. Este método de preparación tiene la desventaja de tener baja productividad.

### VII.3.8. PISTOLA DE AGUJAS

El procedimiento de preparación del sustrato es utilizando la pistola de agujas, que consiste en colocar la pistola en contacto con el acero de refuerzo o la placa metálica hasta que sea retirada toda la capa de corrosión o de pintura hasta obtener un color metálico, denominado estado de «metal casi blanco». Se debe tener cuidado de que la pistola de agujas no este en contacto con las superficies de concreto (véase figura VII.6).

Este procedimiento es utilizado para superficies metálicas para retirar productos de corrosión y pintura.

### VII.3.9. CHORRO DE ARENA SECA O HÚMEDA

El procedimiento de preparación del sustrato por este método consiste arrojar sobre la superficie un chorro de arena sea está seca o húmeda manteniendo la salida de la manguera en posición ortogonal con relación al paramento por limpiar, moviendo constantemente en forma de círculos y distribuyendo uniformemente el chorro para la mejor remoción de todos los residuos que puedan perjudicar la adherencia (véase figura VII.7).

Este método utiliza como equipo un compresor de aire, arena como abrasivo, la cual sale por una manguera conectada al equipo usándose para limpiar grandes áreas tanto de superficies de concreto como de acero de refuerzo. La arena debe tener una granulometría adecuada, debe ser lavada, sin contener materia orgánica y tiene que estar seca en el momento de la utilización. En el caso de chorro de arena y agua, el agua proviene de un tanque que es sometida a presión por una bomba y conducida a un adaptador por una manguera de alta presión. La arena usada en estos trabajos no es reutilizable.

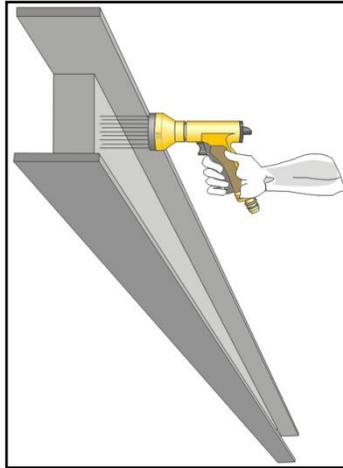


Figura VII.6. Pistola de agujas.

Sin embargo, al utilizar este método no remueve las fracciones con espesor mayor de 3 mm y en ciertos casos precisa escarificación previa, además de que es necesario proceder a la limpieza de la superficie con aire comprimido en el caso de utilizar arena seca.

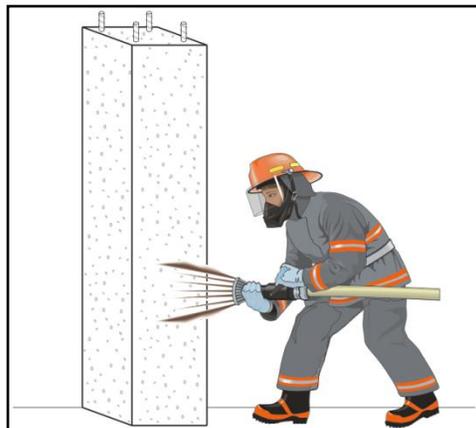


Figura VII.7. Chorro de arena seca o húmeda.

### VII.3.10. DISCO DE CORTE

El método de preparación del sustrato consiste en retirar rebabas, del contorno por limpiar o bien ranurar la superficie para el tratamiento de fisuras, ayudados de una máquina de corte dotada de disco diamantado, para lo cual es necesario marcar con lápiz de cera o equivalente, el contorno de la superficie por ejecutar (véase figura VII.8).

Este procedimiento tiene la desventaja de que requiere mano de obra especializada, además de que requiere una supervisión cuidadosa para no dañar el acero de refuerzo y los estribos y de ser necesario efectuar una limpieza con aire comprimido para remover el polvo.

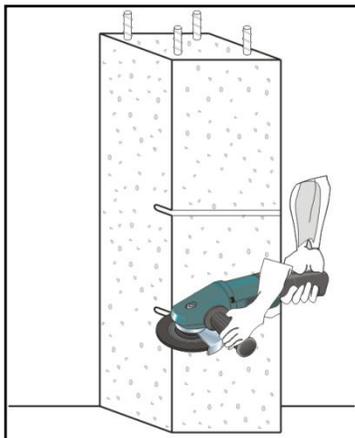


Figura VII.8. Disco de corte.

### VII.3.11. QUEMA CONTROLADA

El procedimiento de quema controlada consiste en tratar de dirigir una flama por medio de un soplete a la superficie por preparar de tal forma que facilite la retirada de capas de concreto disgregado de hasta 5 mm de espesor, procurando no actuar mucho tiempo en la misma región para no calentar mucho la superficie de las regiones sanas, las cuales pueden ser dañadas por este procedimiento.

Este procedimiento es utilizado para preparación de áreas donde no exista acero de refuerzo expuesto o cuando el espesor del recubrimiento sea superior a 30 mm. Sin embargo, se requiere de mano de obra especializada y una supervisión cuidadosa.

### VII.3.12. REMOCIÓN DE ACEITE Y GRASAS IMPREGNADAS

Este método de preparación del sustrato ayuda a la eliminación de aceites y grasas impregnadas en el concreto con espesores superiores a los 3 mm. Sin embargo, se requiere que previamente se lleve a cabo la escarificación mecánica o quema controlada de la superficie por tratar. Una vez realizada la escarificación mecánica o quema controlada, se retira el material suelto para posteriormente remover los aceites y grasas del sustrato por medio de un solvente de alta penetración, adecuadamente formulado para esta finalidad, que no sea corrosivo o biodegradable.

### VII.3.13. MÁQUINA DE DESBASTE SUPERFICIAL

El procedimiento consiste en pre-humedecer la superficie del concreto, una vez hecho esto, con ayuda de fresadoras mecánicas de 30 cm de ancho, ir moviendo el equipo en franjas paralelas, procurando mantener la velocidad de movimiento constante.

Este procedimiento es utilizado para preparar grandes áreas horizontales, como pisos y losas, en donde hay buen recubrimiento del acero de refuerzo y donde es necesario la remoción de espesores de 0.5 a 3 mm. También existen pequeñas máquinas las cuales pueden ser usadas en superficie verticales. Este método tiene la ventaja de ser altamente productiva y retirar eficientemente espesores de modo uniforme.



## VII.4. LIMPIEZA DE SUPERFICIES

La limpieza de las superficies es entendida como el conjunto de procedimientos efectuados instantes antes de la aplicación de los materiales de recuperación. En la tabla VII.2 se reúne los principales procedimientos de limpieza.

Procedimiento	Procedimiento más adecuado para			
	Concreto con superficie		Acero con superficie	
	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda
Chorro de agua fría	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado	Aceptable
Chorro de agua caliente	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado	Aceptable
Vapor	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado	Aceptable
Soluciones ácidas	Inadecuado	Aceptable	Inadecuado	Inadecuado
Soluciones alcalinas	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado	Adecuado
Remoción de aceites y grasas superficiales	Inadecuado	Inadecuado	Adecuado	Adecuado
Chorro de aire comprimido	Adecuado	Aceptable	Adecuado	Aceptable
Solventes volátiles	Adecuado	Adecuado	Inadecuado	Aceptable
Saturación con agua	Inadecuado	Inadecuado	Adecuado	Inadecuado
Aspiración al vacío	Adecuado	Inadecuado	Aceptable	Aceptable

Tabla VII.2. Procedimientos de limpieza.

### VII.4.1. CHORRO CON AGUA FRÍA

Este procedimiento consiste en limpiar con manguera de alta presión comenzando por las partes más altas, procurando mantener una presión adecuada para la remoción de partículas sueltas. Ejecutar, de preferencia, en movimientos circulares con la salida de chorro para facilitar la limpieza de toda la superficie. Este procedimiento es utilizado para grandes áreas, sin embargo, sólo es útil si el sustrato requiere estar húmedo para la aplicación de los materiales de recuperación.

### VII.4.2. CHORRO DE AGUA CALIENTE

Este procedimiento consiste en iniciar la limpieza usando manguera de alta presión y comenzando por las partes más altas, procurando mantener una presión adecuada para la remoción de partículas sueltas. Ejecutar, de preferencia, en movimientos circulares con la salida de chorro para facilitar la limpieza de toda la superficie. Este procedimiento es utilizado para limpiar grandes superficies y levemente contaminadas con grasas, sin embargo, sólo es útil si el sustrato requiere estar húmedo para la aplicación de los materiales de reparación.

### VII.4.3. VAPOR

Este procedimiento utiliza manguera de alta presión dotado de aislamiento térmico para evitar pérdida de calor con salida direccional y caldera para generar vapor, y consiste en limpiar las partes altas, procurando mantener una presión adecuada para la remoción de partículas sueltas. Ejecutar, de preferencia, en movimientos circulares con la salida de vapor para facilitar la limpieza de toda la superficie. Este procedimiento es utilizado para la limpieza de grandes superficies y contaminadas con impurezas orgánicas o minerales (sales), eliminándolas de los paramentos tratados.

#### **VII.4.4. LAVADO CON SOLUCIONES ÁCIDAS**

Este procedimiento utiliza pulverizador, brocha y escoba y consiste en saturar la superficie con agua limpia para evitar la penetración de ácido en el concreto sano. El ácido base utilizado es por lo general ácido muriático, el cual produce efervescencia tomándose como una señal de la descontaminación. Inmediatamente después de reaccionar, lavar la superficie con agua limpia en abundancia, para la remoción de las partículas sólidas y residuos de la solución utilizada. Este procedimiento es utilizado para limpiar grandes superficies en donde el acero de refuerzo no esté expuesto o se encuentre muy próximo a la superficie de remoción de pinturas, carbonatos, eflorescencias, residuos de cemento, impurezas orgánicas u óxidos de metales, además de mejorar las características de adherencia del sustrato.

#### **VII.4.5. LAVADO CON SOLUCIONES ALCALINAS**

Este procedimiento utiliza pulverizador, brocha y escoba y consiste en saturar la superficie con agua limpia para evitar la infiltración de la solución alcalina, que podría modificar las características del concreto. Inmediatamente aplicar la solución con una manguera con agua. Este procedimiento es utilizado para limpiar grandes superficies que presenten residuos ácidos impregnados y la limpieza de superficies contaminadas con hongos y musgo. Sin embargo, se debe tener cuidado de no aplicarla cuando exista la presencia de agregados reactivos en el concreto, ya que puede provocar la expansión debida a la reacción álcali-agregado. Tiene la desventaja de dificultar la adherencia de productos de base de resinas epóxica.

#### **VII.4.6. REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS SUPERFICIALES**

Este procedimiento utiliza escoba y brocha y consiste en aplicar un removedor-limpiador directamente sobre la superficie, dejándolo reaccionar por 20 minutos. En seguida se lava la superficie con agua en abundancia con el auxilio de la escoba, para remover partículas sólidas y residuos del producto utilizado. Este procedimiento es utilizado para limpiar superficies horizontales (pisos) contaminadas superficialmente, con espesores menores a 2 mm.

#### **VII.4.7. CHORRO CON AIRE COMPRIMIDO**

Este procedimiento utiliza manguera de alta presión y compresor dotado de filtro de aire y de aceite, para garantizar la descontaminación y consiste en colocar en el interior de las cavidades la extremidad de la manguera, ejecutando la limpieza del interior. Una vez limpias, las cavidades deben ser rellenadas con papel, procediendo entonces a la limpieza de la superficie adyacente. Es importante comenzar siempre el proceso por las cavidades, pasando después a las superficies vecinas, para evitar el depósito de polvo en su interior. Este procedimiento es utilizado para la eliminación de polvo después de los procedimientos de preparación del sustrato, como escarificación, cepillado o chorro de arena a alta presión, o cuando la superficie a reparar debe estar seca y limpia.

#### **VII.4.8. SOLVENTES VOLÁTILES**

Este procedimiento utiliza brocha, estopa y algodón y consiste en aplicar el producto (acetona industrial) con estopa, brocha o algodón en las superficies y ejecutar movimientos adecuados para la retirada de eventuales residuos y contaminantes. Retira contaminaciones superficiales de grasas, aceites y pinturas. Por ser altamente volátil evapora llevando partículas de agua de la superficie y consecuentemente ayuda al secado superficial. Este procedimiento es utilizado para la limpieza de concreto y acero instantes antes de la aplicación de resinas de base epóxica.



---

#### VII.4.9. SATURACIÓN CON AGUA

Este procedimiento utiliza manguera perforadora y saco de yute y consiste en inundar totalmente la superficie a ser tratada por un período de, por lo menos, 12 horas antes de aplicar los productos de base cemento. Esa inmersión puede lograrse con la construcción de barreras temporales y manguera con flujo de agua continuo. En superficies verticales, es necesario, cuando la inmersión no fuera viable, formar una película continua de agua en la superficie con el auxilio de sacos de yute y mangueras perforadas. Instantes antes de la aplicación de los productos de reparación, retirar el agua y secar, con estopa seca y limpia, el exceso de agua superficial, obteniendo la condición de superficie saturada y seca (no encharcada). Este procedimiento es utilizado para el tratamiento de superficies de concreto antes de la aplicación de morteros y concretos de base cemento.

#### VII.4.10. ASPIRACIÓN AL VACÍO

Este procedimiento utiliza aspiradora de polvo industrial especialmente proyectado y equipado para aspirar polvo de concreto, con alta potencia y consiste en aspirar cuidadosamente las áreas que serán tratadas manteniendo la boca del aspirador próxima (2 mm) a la superficie del concreto. Este procedimiento es utilizado para la limpieza en seco de superficies de concreto.

### VII.5. AGENTES DE ADHERENCIA

Frecuentemente se usan tres tipos principales de agentes de adherencia: lechadas a base de cemento, epóxicos, y emulsiones de látex.

Para preparaciones de capas superpuestas a base de cemento portland, se usa lechada de cemento o de cemento y arena. Después de que sido preparado el sustrato, e inmediatamente antes de la colocación del material de reparación, se debe aplicar vigorosamente y complementarse con escoba o cepillo una delgada capa de lechada "pastosa" sobre la superficie preparada. En el caso del material de reparación en capas superpuestas modificadas con látex o con microsílíce, la lechada adherente puede ser aplicada con escoba desde la mezcla misma. Para material modificado con látex, también puede ser mezclado separadamente. Actualmente pueden conseguirse agentes de adherencia de lechadas de cemento modificadas por látex y combinadas en fábrica que se mezclan con agua en el sitio y se aplican a la superficie preparada del concreto.

Deben seguirse estrictamente las instrucciones del fabricante cuando se usen productos de látex, porque no todos son compatibles con el concreto. Los siguientes productos látex se usan como agentes de adherencia:

- Estireno butadieno.
- Acrílico.
- Polivinilacetato.

Los agentes de adherencia de polivinilacetato que pueden volver a emulsionarse, no deben usarse en aplicaciones estructurales. Este agente puede reemulsionarse después de haber estado a ciclos de mojado y secado, dando como resultado eventual pérdida de adherencia.

Se puede encontrar una variedad de productos epóxicos para usarse como compuesto de adherencia. El uso de un agente adherente epóxico puede producir una barrera de vapor, que da como resultado la falta de adherencia. Los epóxicos tienen pobres propiedades de adherencia y deben evitarse cuando la reparación esté sujeta a carga constante.

Los agentes de adherencia no están diseñados para compensar la pobre preparación de la superficie.

## VII.6. REFUERZO MEDIANTE RECRECIDOS CON CONCRETO ARMADO

El sistema de reparación o refuerzo mediante recrecidos realizados con concreto armado envolviendo al elemento estructural débil o dañado es uno de los más antiguos, económicos y eficaces que existen. Sin embargo, este sistema tiene los inconvenientes de que el elemento reparado o reforzado no puede ponerse en carga hasta que el concreto no haya alcanzado sus resistencias de cálculo (como mínimo 28 días); que las dimensiones del mismo aumenten de forma sensible por razones constructivas por lo que su cambio de rigidez puede afectar a parte de la estructura; que al ser grande el incremento de sección se creen problemas de espacio, estéticos, etc.

El concreto armado puede emplearse en reparar o reforzar elementos frente a compresión, flexión, cortante y torsión.

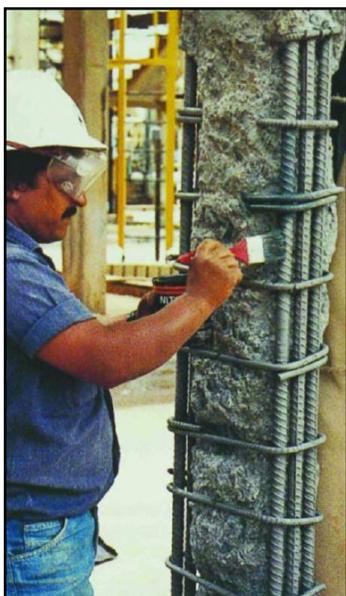


Foto VII.1. Aplicación de un agente de adherencia sobre una columna para su posterior recrecido

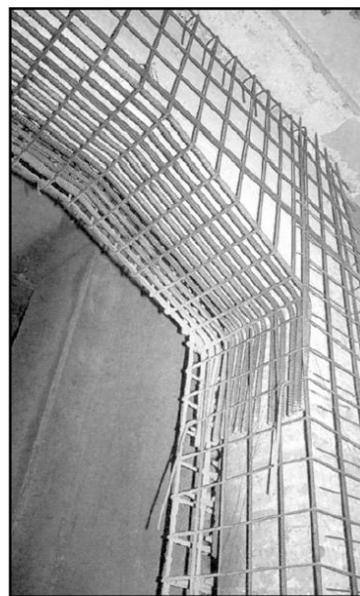


Foto VII.2. Recrecido mediante concreto armado de elemento.

### VII.6.1. REFORZAMIENTO DE COLUMNAS

El refuerzo de columnas dañadas mediante concreto armado por medio de un recrecido puede realizarse mediante el empleo de concreto colado o concreto lanzado. El cualquiera de los dos casos se produce un efecto zuncho debido a la propia retracción del concreto que envuelve al elemento existente y mejora la adherencia entre los dos materiales con lo cual las cargas se transmiten, no sólo de forma usual sino también por fricción entre los dos concretos.

El aumento de la sección transversal de una columna existente fortalecerá la columna, incrementando su capacidad de carga. Una columna puede ser agrandada en varias configuraciones. En la figura VII.9, el método (a) conseguirá una transferencia de la carga eficiente. Después de que ha ocurrido la mayor parte de la contracción por secado, pueden instalarse los amarres que unan al concreto viejo con el nuevo. El espacio entre la nueva porción de la columna y el miembro existente para ser parcialmente soportado por esta

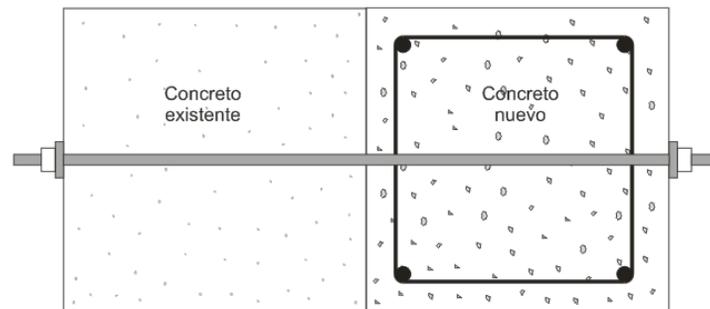
columna puede ser llenado con un material de empaquetado seco. Esto permitirá que el nuevo material comparta su porción de carga. Cuando se usan los métodos (b) y (c), debe tenerse mucho cuidado para seleccionar diseños de mezcla de concreto con coeficientes de contracción muy bajos.

### VII.6.2. REFORZAMIENTO DE VIGAS

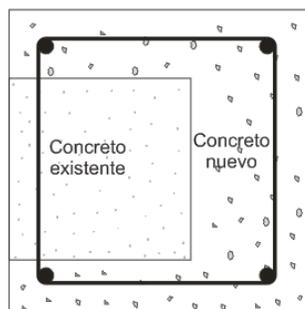
La capacidad de flexión de miembros de concreto requiere ser incrementada cuando se descubre una deficiencia de diseño, cuando ocurre deflexión excesiva o cuando se anticipan cargas adicionales.

Las varias técnicas usadas para incrementar la capacidad a flexión incluyen:

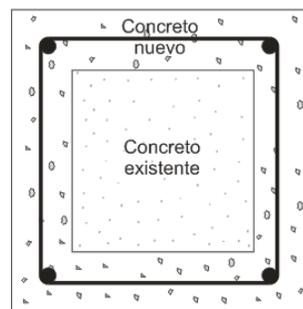
- Encajonamiento de concreto.
- Refuerzo externamente adherido.
- Capas superpuestas de concreto.



Método (a)



Método (b)

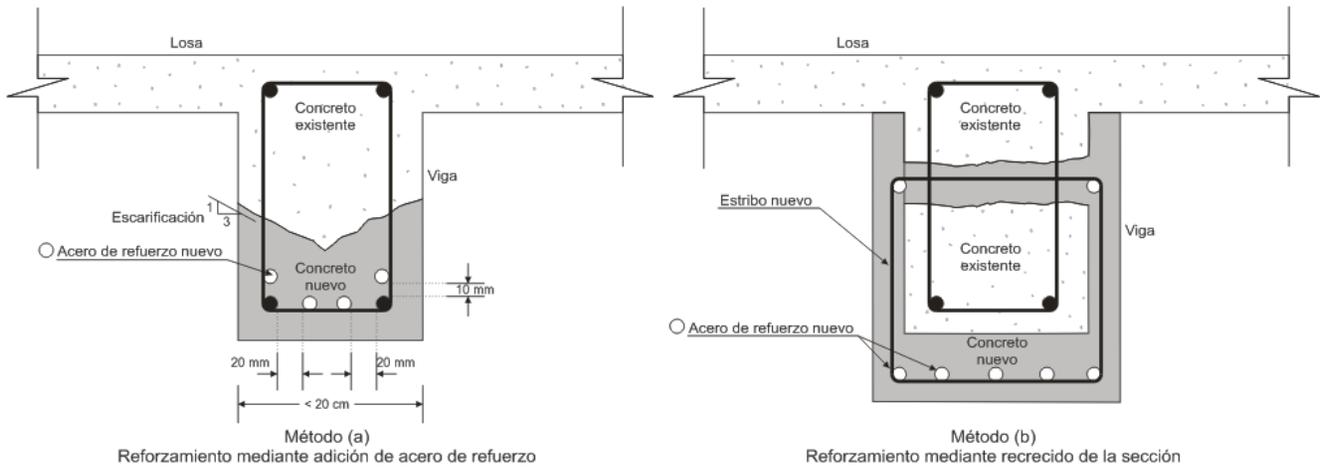


Método (c)

**Figura VII.9.** Diferentes configuraciones para el recrecido de una columna.

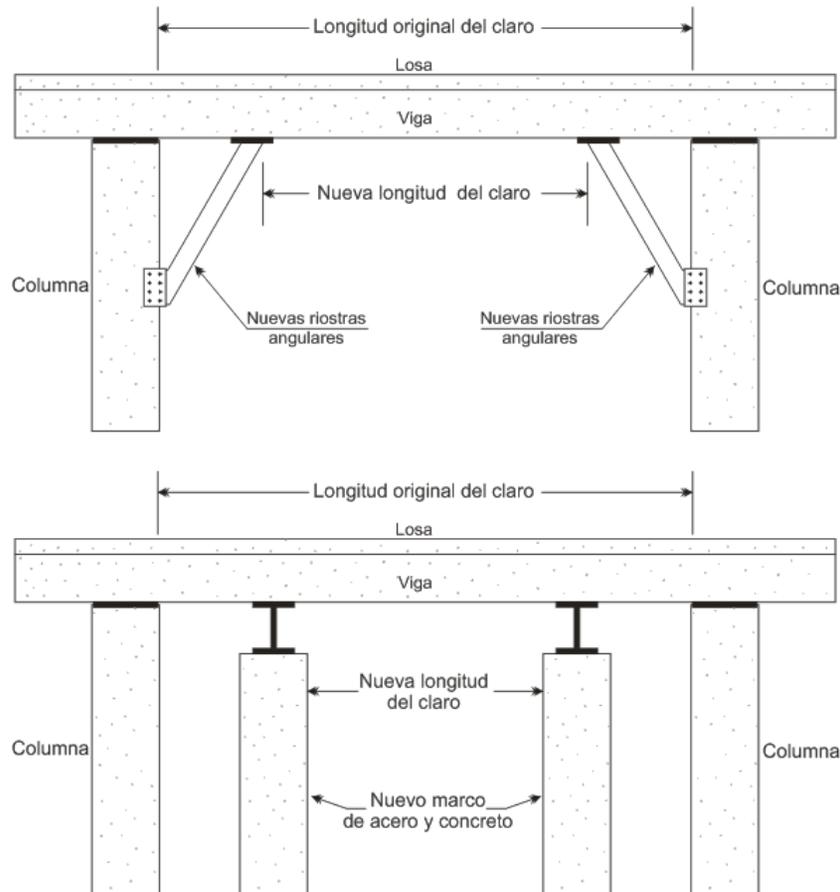
- Disminución de la longitud de claros.
- Apoyo suplementario.

Las técnicas de capas adicionales de concreto han sido efectivas cuando se han usado para incrementar la capacidad a flexión de las vigas de concreto. Esta técnica involucra la adición de una considerable carga muerta, requiriendo así un análisis cuidadoso de sus efectos en los elementos estructurales de apoyo (véase figura VII.10).



**Figura VII.10.** Diferentes configuraciones para el reforzamiento de una viga.

El acortamiento o disminución de la longitud de claros, que agregan capacidad adicional de flexión o rigidez, puede ser muy rentable. La reducción de claros para losas y vigas se logra por varios métodos, incluyendo el aumento de los capiteles de columnas, agregando riostras diagonales de concreto o acero, o la colocación de un marco auxiliar dentro del claro (véase figura VII.11).



**Figura VII.11.** Técnica de acortamiento o reducción de claros.



### VII.6.3. REFORZAMIENTO DE LOSAS

Las losas pueden cubrir una capacidad adicional desde el lado superior o desde el lecho bajo. Cuando se construyen capas adicionales en el lecho bajo pueden usarse técnicas de concreto lanzado o de bombeo y moldes (véase figura VII.12).

Las capas superpuestas se usan para reparar estructuras de concreto como un remedio para una variedad de problemas del mismo. Pueden usarse para mejorar el drenaje, para mejorar el tráfico de vehículos o la capacidad para soportar cargas; para incrementar la resistencia a derrapadas; o para proteger el concreto subyacente contra ambientes agresivos. Muchas capas superpuestas también atienden problemas de deterioro de superficies subyacentes. Las capas superpuestas pueden ser hechas de diferentes materiales desde muy delgadas (3 mm) hasta muy gruesas. Los tableros de puentes y las plataformas de estacionamiento, así como también los pavimentos de concreto, son lugares comunes para el uso de capas superpuestas adheridas para restaurar el concreto existente tratado y deteriorado. La preparación de la superficie de las plataformas existentes utilizan técnicas de molido, hidrodemolición y martillo manual. Los materiales comunes usados en las capas superpuestas son concretos de cemento portland con una baja relación agua/cemento, concreto de cemento portland modificado con látex y concreto de cemento portland modificado con microsílíce. La mayoría de las capas superpuestas adheridas usadas en la reparación de las plataformas de estacionamiento, tableros de puentes y pavimentos involucran rangos de grosor de 38 a 76 mm (1.5 a 3 pulgadas). Muchas aplicaciones no requieren de refuerzos adicionales. Las capas superpuestas requieren prestar atención especial a las técnicas de operación para evitar varios problemas tales como agrietamiento por contracción plástica, falta de consolidación, segregación o pobre adherencia.

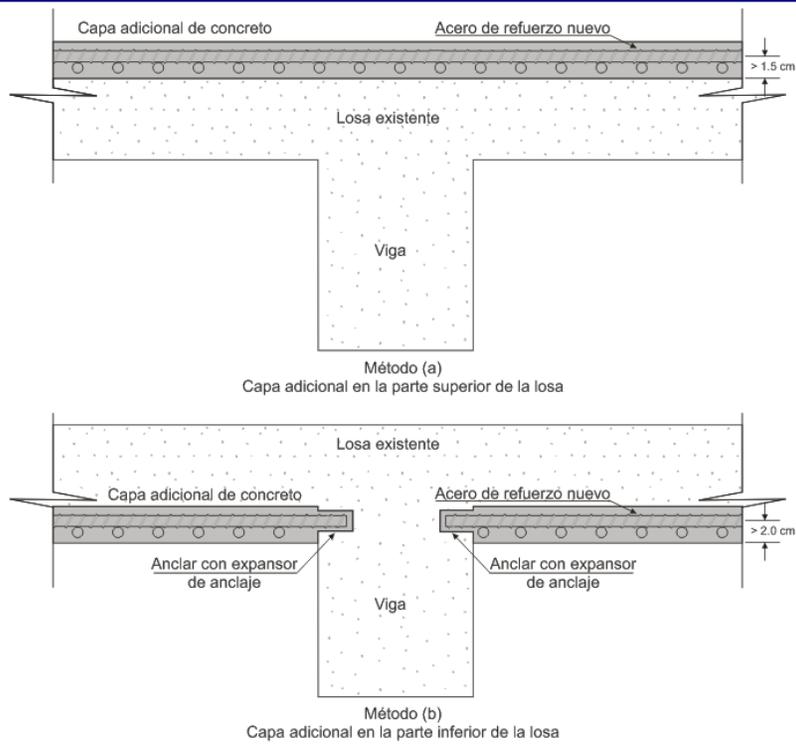
Otros tipos de capas superpuestas involucran el uso de polímeros o morteros modificados con polímeros para aplicaciones delgadas de 3 mm de espesor. El polímero más común es el epóxico que se combina con arena graduada para formar un mortero. Los polímeros también ofrecen protección adicional contra ambientes agresivos.

#### VII.6.3.1. Corrección de una losa flexionada con una placa de acero adherida

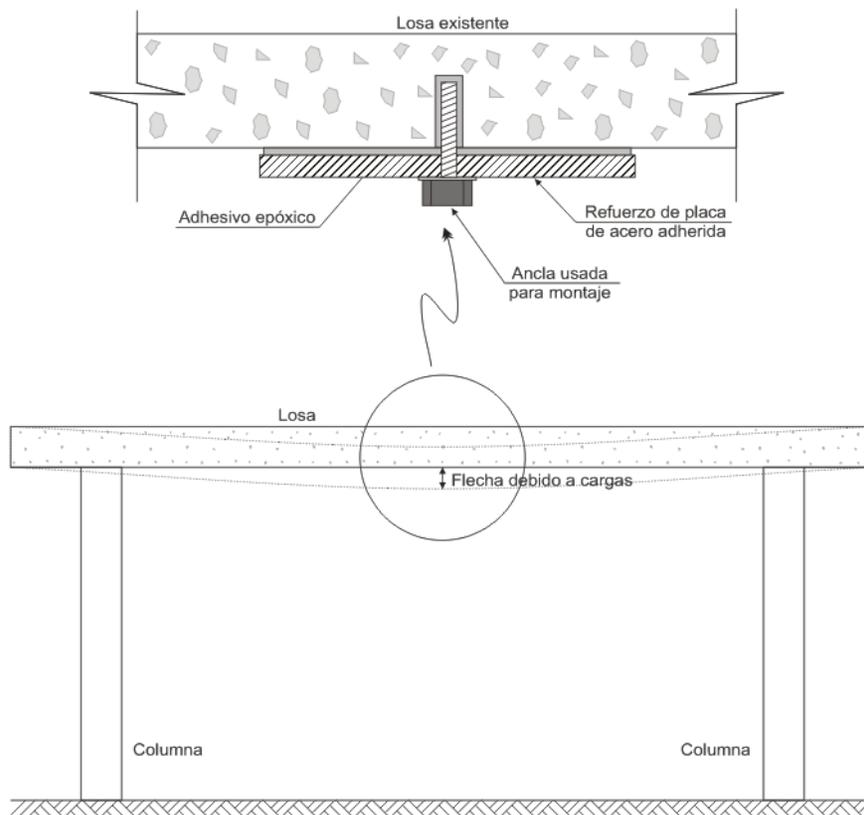
El procedimiento para corregir una losa a flexión es el siguiente:

- a) Levantar la losa a la posición de diseño o ligeramente por encima de esa posición.
- b) Instalar el nuevo refuerzo adherido al lecho bajo de la misma losa.
- c) Liberar el apuntalamiento temporal.

De esta forma las cargas serán transferidas al nuevo refuerzo adherido y de esta forma la deflexión de la losa es controlada (véase figura VII.13).



**Figura VII.12.** Reforzamiento de losas mediante capas adicionales de concreto.



**Figura VII.13.** Corrección de una losa flexionada con una placa de acero adherida.

## VII.7. RECALCE

Recalzar es reforzar una cimentación mediante recalzo, esto es, recurriendo a una obra de reparación y afianzamiento aplicado a las cimentaciones de una construcción. Se trata del remedio más corrientemente empleado para sanear unos cimientos que han cedido o que amenazan con ceder.

El refuerzo de las cimentaciones, por lo general significa ensanchar la base y a veces, también profundizar la misma. Salvo excepciones, los motivos que inducen a recalzar unos cimientos son principalmente dos:

- Que se haya producido un hundimiento en los muros soportantes (medida correctora).
- Que se prevé aumentar la carga que gravita sobre los cimientos (medidas previsoras).

Este último caso ocurre algunas veces, cuando los propietarios de una construcción, en un momento determinado pretenden elevar el edificio mediante la adición de una o más plantas. Pero si no tiene en cuenta que las cimentaciones han sido calculadas, proyectadas y construídas para soportar una carga distinta el resultado de modificar la altura de la construcción añadiendo nuevos pisos, la sobrecarga se apoyará sobre una base fundacional, que con toda probabilidad, será insuficiente. El fallo dará lugar, entonces a un cedimiento.

Existen varias formas de actuación. Una de ellas es la indicada en la figura VII.14, en la cual se ejecuta el ensanchamiento del plano de sustentación del cimiento abriendo agujeros de trecho en trecho en el cimiento existente, o bien excavando el terreno por debajo de éste y se pasan barras de hierro por los agujeros o por debajo de los cimientos, los cuales constituirán la armadura principal de las placas en voladizo. Para fatigas admisibles del terreno han de tener una longitud libre y un grueso mínimo capaz de resistir al fenómeno flector.

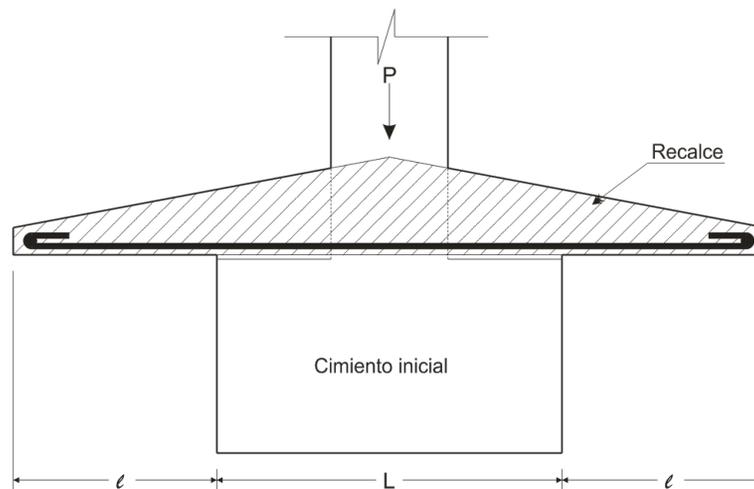


Figura VII.14. Ensanchamiento del plano de sustentación de los cimientos.

Puede ser necesario que la base de cimiento deba apoyarse sobre un terreno más resistente. Entonces será preciso buscar a mayor profundidad un nuevo plano de apoyo y construir, entre el plano de asiento primitivo y el hallado. La excavación deberá de realizarse de metro en metro, sin que se habrá ninguna sepa antes de haber fraguado las contiguas.

Cuando no se encuentre un terreno con suficiente resistencia a escasa profundidad, se procederá a consolidar el terreno que va a servir de plano de apoyo por medio de pilotes dispuestos sobre la totalidad de la anchura de base. La cabeza de los pilotes sobresaldrán sobre este plano de 30 a 50 cm y, quedarán embebidos en la capa de concreto de 150 cm de espesor y, por último, se levanta sobre esta un muro de ladrillo macizo, asentado con mortero de cemento y arena (véase figura VII.15).

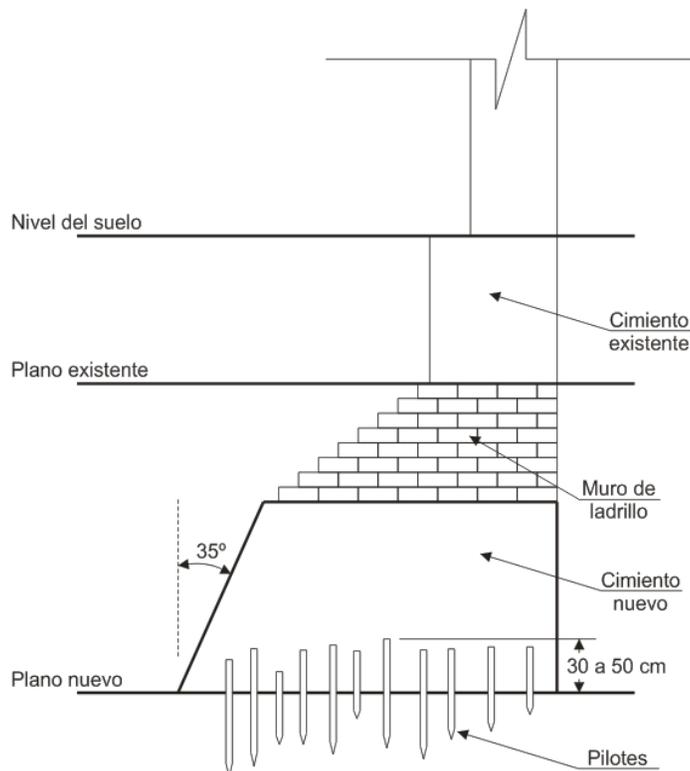


Figura VII.15. Esquemización de la forma de actuar cuando la base de la fundación deba apoyarse sobre un terreno más resistente.

### VII.7.1. APLASTAMIENTO DE UN CIMENTACIÓN

Las lesiones producidas por aplastamiento de las cimentaciones tienen casi siempre su origen en la disgregación del aglomerante o en la rotura de los áridos que forman parte de la cimentación. A esta situación se puede llegar principalmente por tres causas:

- Exceso de carga.
- Utilización de materiales defectuosos o inconsistentes, como por ejemplo, materiales de derribo.
- Vejez.

La vejez, una vez superada, suele dar lugar a la presencia de un segundo período, caracterizada por la rotura de los áridos, y supone el prelude de la fase final, el aplastamiento propiamente dicho, que no podrá apreciarse hasta el momento en que se produce el hundimiento, que se presentará de improviso, ocasionando el derrumbe instantáneo.



El aplastamiento de los cimientos de los pilares o en la parte extrema de una cimentación es más grave que si se produce en un tramo intermedio de la misma. En efecto, en los primeros casos el hundimiento de la cimentación arrastra al pilar o la esquina del muro que carga sobre la parte aplastada, mientras que en el último caso, el muro que gravita sobre el tramo de la cimentación que ha cedido se resistirá solamente de una manera parcial.

Ya sabemos que antes de reconstruir una cimentación lesionada hay que consolidar provisionalmente la construcción que cargue sobre ella, con objeto de que descargue la parte que se ha de reparar para permitir la ejecución de las obras necesarias.

Cuando la disgregación del aglomerante se ha producido por exceso de carga, hay que reformar la superficie de la cimentación. Para ello se abrirá de trecho en trecho unos agujeros en las cimentaciones, pasándose barras de hierro que constituirán la armadura principal de las placas en voladizo. De tramo en tramo se excavaba a uno y otro lado de las cimentaciones a reforzar unas zanjas, hasta llegar a la base. Estas zanjas se rellenarán con concreto. Las placas en voladizo descansarán sobre el suplemento llevado a cabo en uno y otro lado de la cimentación reforzada. Estas placas en voladizo que pueden sustituir los perfiles laminados de doble T, que quedarán embebidos en el concreto de relleno.

En el caso de ser los cimientos escalonados o estar en talud, se suplementarán con macizos de concreto en masa. La inclinación que se dará a estos paramentos en talud no excederá de los 35°.

El refuerzo de las cimentaciones puede ser continuo, o bien aplicarse únicamente en donde exista concentración de cargas, según señalen las propias zonas agrietadas o aconseje el cálculo de las fatigas de las diversas secciones de la cimentación.

Hay que tener presente, durante la realización de la obra, que las zanjas no se pueden excavar nunca de forma continua, aunque el refuerzo si deba serlo. Por el contrario, estas zanjas se abrirán de trecho en trecho y no se excavarán las zanjas intermedias antes de haber rellenado y compactado la continua. De no seguir esta norma elemental, se producirá instantáneamente el hundimiento de la construcción.

En ciertos casos, el estado de las cimentaciones es tan lamentable que no debe ser objeto de refuerzo, sino de sustitución parcial en las zonas afectadas. Esto ocurrirá, por ejemplo, cuando ya se ha producido el hundimiento o se halla en inminente trance de que se provoque el mismo, a causa de vejez o deficiencias en la estructura de la cimentación. La forma de actuar será muy parecida aunque las zanjas que se excavarán de trecho en trecho servirán para eliminar la parte de la cimentación enferma puesta al descubierto y reconstruirla con otra nueva de concreto. Será preciso dejar preparaciones en esta reconstrucción para su unión con los tramos contiguos, acunando bien con la base de la construcción que cargue encima.

No creemos necesario decir que esta sustitución corresponde a una operación que entraña cierto peligro, por lo que deben ser evacuados sin excusa los moradores del inmueble mientras duran las obras. Convendrá asimismo desalojar las zonas afectadas de muebles y enseres, es decir, retirar todo cuando se pueda perder o destrozarse en el caso de producirse un desplome durante los trabajos de reparación.

## VII.7.2. SISTEMAS PARA EL RECALCE DE CIMIENTOS

El recalce de un edificio puede realizarse de diferentes formas, de las que mencionaremos las más corrientes, advirtiendo que la mayoría de los procedimientos existentes son simples variaciones de los tres o cuatro fundamentales.

Uno de ellos es el que reproduce la figura VII.16, que opera por mitades. Primeramente se actúa sobre la media cimentación (indicada con trazo oblicuo en la figura) y una vez rellenada y compactada la obra, se pasa seguidamente a reparar la otra mitad. Este sistema supone que mientras la reparación, cada mitad soporta el peso de los muros, ayudada si se estima conveniente con puntales; el reparto de las cargas permite que las obras de consolidación provisional sean menores. Tiene el inconveniente en cambio, de que como resultado de la operación se establecerá una junta en toda la longitud de los cimientos, y aunque esta no amenace seriamente la estabilidad de la construcción, puede provocar el desarrollo de fuerzas capilares.

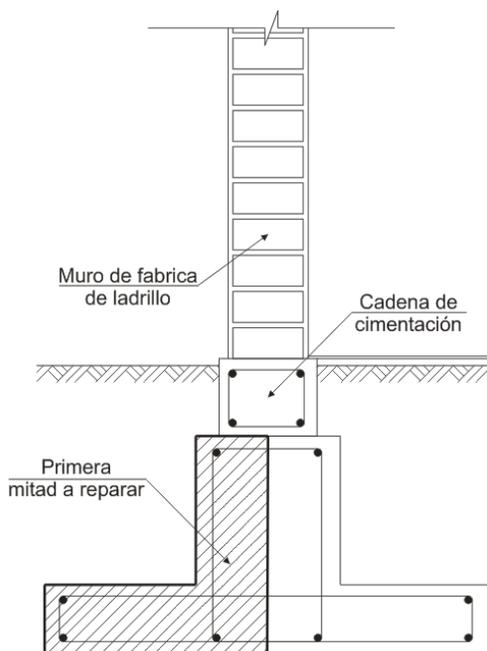


Figura VII.16. Reparación de unos cimientos por el sistema de las dos mitades.

El llamado «recalce por puntos» es ideal para cimentaciones corridas, en este método se lleva a cabo la demolición alternativa para cada metro de la cimentación. El problema que se mencionó al comentar el ejemplo anterior, ahora se acentúa, pues aparte de favorecer las filtraciones del agua de lluvia por las juntas de los muros, con la consiguiente aparición de humedades, será inevitable la pérdida de continuidad monolítica de la cimentación.

En el supuesto de que los muros puedan aguantar por sí mismos y con el complemento de puntales, su peso propio y el de la cubierta durante el tiempo que duren las obras, se puede aplicar el sistema que indicaremos en seguida. Los hierros de la armadura de los muros que atraviesan los mismos longitudinalmente, pueden trabajar a modo de viguetas provisionales, y por lo tanto permiten que se deje entre dos pilares consecutivos (en los cuales están anclados) el espacio necesario no sólo para trabajar con comodidad, sino también para construir la cimentación en forma escalonada. De esta manera cuando de cuele los pilares se contará con una superficies que ofrezcan ciertas garantías de seguridad.



---

### VII.7.3. LA CEMENTACIÓN

Los que hemos descrito anteriormente son los sistemas tradicionales que vienen usándose desde hace muchos años y que todavía se mantienen en vigencia. Existen otros procedimientos de recalzar más modernos, basados en tecnologías más avanzadas. Pero salvo en ciertos casos, las inyecciones de cemento, lo que se denomina una «cementación», suponen sistemas costosos y complicados, cuya intervención requiere el concurso de maquinaria especial y personal altamente calificado para su aplicación. De hecho, se recurre a ellos para solucionar problemas graves de grandes edificios. Por ello, cuando se trata de construcciones de baja magnitud, como casas de vivienda unifamiliares de una a tres plantas y construcciones similares, en la mayoría de las ocasiones se suele recurrir todavía a los métodos convencionales.

La cementación consiste, esencialmente, en inyectar una lechada de cemento en el interior de los cimientos lesionados o en el mismo terreno adyacente, para aumentar su compacidad y capacidad de resistencia. El sistema de inyecciones para consolidación e impermeabilización, a base de mortero, cemento o productos químicos, es eficaz, seguro y rápido, siempre que se aplique en las debidas condiciones; una de las principales, que se actúa sobre materiales sólidos, que tengan un importante porcentaje de oquedades internas, en las que se fácil penetrar el conglomerante inyectado en estado muy fluido. Está indicado, por lo tanto, en fábricas de ladrillos y mampostería tratadas con mortero, en cuyas juntas se presupone la existencia de suficientes huecos para permitir la actuación de la colada de cemento. También se emplea para consolidar los terrenos que se han movido y han causado la translación de los cimientos.

Para inyectar el cemento o el mortero, suele aprovecharse un pequeño hueco de entrada que puede encontrarse estratégicamente situado, previo a su ensanchamiento, si fuera necesario, con un escoplo o una herramienta apropiada, para permitir el acoplamiento de la boquilla inyectora. Se favorece la penetración del aglomerante practicando un orificio con sondas de rotación. La sonda tiene la ventaja de que, al mismo tiempo que se utiliza para abrir los orificios de entrada, puede aprovecharse para extraer muestras cilíndricas de los materiales que atraviesa.

La inyección acostumbra a realizarse en tres fases, separadas entre sí, por el transcurso de 24 horas. Antes de introducir la primera colada es aconsejable inyectar agua limpia sin ninguna clase de adictivos, con la finalidad de abrir el paso a la red interior capilar y que la operación sea más eficaz y se desarrolle en menos tiempo.

### VII.7.4. ESTABILIDAD DEL TERRENO POR SILICATACIÓN

Aquellos terrenos que no reúnen las condiciones debidas de consistencia, entrañan peligros de hundimiento, en lo que en definitiva se traduce en la posibilidad de que se produzcan agrietamientos en las construcciones levantadas en ellos. Conviene entonces estabilizar aquél terreno para conferirles artificialmente las características de compacidad y de resistencia que le faltan.

El procedimiento genérico que se utiliza se base en inyectar al terreno una solución química capaz de proporcionarle la consistencia y dureza necesaria. Existen varios procedimientos para conseguir la consolidación deseada. Uno de los más conocidos es el llamado Joosten, que fundamentalmente consiste en inyectar silicato sódico en el terreno, y a continuación, ácido silícico que reacciona con el silicato, verificándose entonces la solidificación. Las inyecciones que se realizan por intermedio de uno de los conductos puntiagudos de acero que se introducen en el terreno hasta alcanzar una profundidad

aproximada de 25 m. Las variantes que existen de este sistema difieren en pequeños detalles, pero fundamentalmente se fundan en los mismos principios.

La resistencia de los terrenos solidificados por este procedimiento dependen de la naturaleza de los mismos; pero como mínimo se acepta que triplican el coeficiente de resistencia que se tenía antes de ser tratados. Y en muchas ocasiones pueden incluso multiplicar dicho valor por 10. Además, La resistencia de un terreno consolidado por silicatación suele aumentar con el paso del tiempo. Según se ha comprobado en pruebas de laboratorio, probetas con muestras extraídas del terreno veintiocho días después de la consolidación y ensayada oportunamente, dieron coeficiente de resistencia de  $22.50 \text{ kg/cm}^2$ , seis meses más tarde, la misma alcanzada los  $40.50 \text{ kg/cm}^2$ .

También se ha empleado una mezcla muy fluida de cemento portland y agua, y que lleva incorporados diversos materiales para acentuar la dureza y resistencia del terreno, tales como arcilla, arena, polvo mineral, etc. La solución acostumbra a integrar también un aditivo, el cual tiene la misión de retardar el fraguado para permitir que la mezcla llegue al interior de los poros más pequeños del terreno.

#### VII.7.5. PILOTAJE

Cuando el cedimiento de las cimentaciones tiene su origen en el hundimiento del terreno, lo más indicado será reforzar la base de sustentación en la que descansan las cimentaciones. Si el terreno natural es flojo o esta encharcado y las inyecciones de cemento no tienen un campo propicio para actuar, una solución al problema planteado puede consistir en que se prescindiera del estrato inconsistente y se busque otro de mayor firmeza por medio de pilotaje, esto es, de un conjunto de pilotes hincados en tierra, con la longitud necesaria para que descansan en terreno firme, y en cuya cabeza se dispondrá un plinto a manera de plataforma de concreto armado, que servirá de base para los muros de sustentación del edificio.

Los pilotes, que antiguamente eran de madera y sección cilíndrica, se hincan en terreno a manera de estacas empotradas. La penetración se facilita armando el extremo de introducción con una punta de hierro que, en muchos modelos, incorpora una ala helicoidal para facilitar su avance con giro de rosca y fijar la posición alcanzada.

Actualmente, aun cuando se siguen empleando los pilotes de madera, tienen mayor aceptación los de hierro y, sobre todo, los de concreto armado.

El conjunto formado por los pilotes y el plinto trabajan como los cimientos y se aplican cuando la consolidación de las antiguas cimentaciones lesionadas presentan serias dificultades. Aunque es un recurso típico de la ingeniería hidráulica, ya que los pilotes son característicos de la construcción de puentes, diques, puertos, etc., así como de las edificaciones lacustres, hoy en día han encontrado un amplio campo de actuación en la arquitectura y es corriente utilizarlos para reforzar cimentaciones que acusen fallos de resistencia y de cohesión.

Los pilotes de concreto, en algunas ocasiones se fabrican al pie de obra, vertiendo la masa aglomerante en los orificios cilíndricos que han practicado las sondas donde se han dispuesto las correspondientes armaduras de acero de refuerzo. Las paredes del propio terreno hacen de encofrado perdido. Para que el pilote cumpla la misión asignada, se aconseja que las unidades estén situadas tangencialmente al perímetro del plinto y enlazados con este último por medio de ménsulas soportes o cualquier otro sistema efectivo, como por ejemplo puntales dispuestos transversalmente.



Teniendo en cuenta que los pilotes son un remedio que se aplica cuando los terrenos carecen de cohesión o tienen un índice muy bajo, para actuar sin que se produzcan peligrosas reacciones que podrían afectar a toda la operación reparadora, se deben utilizar sondas de pequeño diámetro y que trabajen por rotación, nunca del tipo percutor. Por este motivo se suele recurrir a los llamados micropilotes, cuyo diámetro no suele llegar a los 30 cm.

Los micropilotes se disponen formando pantalla para sustituir a los métodos tradicionales. Su aplicación constituye una técnica especializada que requiere máquinas y operarios calificados, pero que resultan insustituibles cuando el terreno no puede soportar la hincada de los pilotes corrientes, bien sea por que el espacio disponible impida llevar adelante la operación desahogadamente o por cualquier otra causa.

## VII.8. CONCRETO Y MORTERO LANZADO

El concreto y mortero lanzado es un material formado por una mezcla de cemento, agua, agregados de tamaño reducido y, en su caso, aditivos, fibras, etc., que se lanzan o proyectan a través de una boquilla sobre la superficie soporte, ya sea de una construcción nueva o de una en proceso de reparación. El agua puede incorporarse a la mezcla en la misma boquilla de lanzamiento, dando lugar al sistema de vía seca o bien llegar a ésta mezclada con los demás componentes del concreto formado el sistema de vía húmeda.

En el sistema de vía seca, el cemento y el árido se mezclan en una concretera o mezcladora en seco y esta mezcla se introduce en la máquina de lanzado desde donde, mediante presión conseguida por aire comprimido, se transporta a lo largo de una manguera flexible hasta una boquilla o cañón donde en su entrada se incorpora a la mezcla el agua a presión a través de su anillo difusor. En el caso de emplear aditivos, éstos pueden incorporarse en estado sólido pulverulento en la concretera o bien en estado líquido junto con el agua en la boquilla. Si se emplean fibras de acero o plástico, su incorporación se hace en la mezcladora. En este sistema la cantidad de agua a incorporar a la mezcla la regula el operario que maneja la boquilla.

En el sistema de vía húmeda la mezcla de cemento, agregados, agua y, en el caso, aditivos líquidos (excepto los aceleradores que se incorporan en la boquilla) y fibras de mezclas en el cuerpo de la propia máquina y esta mezcla húmeda se transporta a presión a lo largo de la manguera flexible hasta la boquilla a la cual se le aplica aire comprimido para lograr que la mezcla salga a la velocidad requerida. En este caso, el operario encargado del lanzamiento no tiene participación en la cantidad de agua que se incorpora a la mezcla.

El sistema de vía seca es más empleado que el de vía húmeda debido a que el equipo es muy manejable, de menor costo y más flexible en el trabajo.

El concreto lanzado cuando está formado con agregados de tamaño máximo de 5 mm recibe el nombre de mortero lanzado y es el más empleado en los trabajos de reparación de estructuras.

Este tipo de concreto o mortero se puede considerar como especial no sólo por lo que a su composición respecta sino también por su forma de colocación en obra que puede realizarse sin el empleo de cimbras o moldes y sobre superficies con cualquier inclinación e incluso en techos.

Con este sistema se pueden poner en obra capas delgadas de concreto de muy buenas características que se adhieren perfectamente a las superficies de la estructura dando lugar a revestimientos protectores frente a la corrosión de armaduras y restaurando el concreto perdido ya sea por abrasión, por el desprendimiento en el caso de incendios o de corrosión, y creando una superficie con una terminación aceptable.

El concreto y mortero lanzado pueden tener características especiales que pueden conseguirse mediante la adición al mismo de fibras metálicas o plásticas, de emulsiones de polímeros (látex), de microsílíce, cementos modificados, aditivos, etc.

Los cementos empleados en la fabricación de concretos y morteros lanzados pueden ser los mismos que se usan en los tradicionales. También puede emplearse cemento aluminoso en la fabricación de concretos y morteros refractarios.

En aplicaciones a bajas temperaturas se emplean altas dosificaciones de cemento con una alta finura de molido con el fin de obtener una rápida hidratación y altas resistencias iniciales.

Actualmente se están empleando cementos modificados, con una gran finura de molido que permiten conseguir mezclas de altas resistencias iniciales y gran cohesión para aplicarse de una vez en capas de hasta 40 cm de espesor.

Los agregados más recomendados son los redondos los cuales deberán de cumplir en cuanto a contenido mínimo de sustancias perjudiciales. La granulometría de los agregados es impuesta por las características de la máquina empleada y en función del diámetro de la manguera, boquilla o cañón, de la presión del aire y del agua entre otros factores.

Los módulos de finura de los agregados finos deben estar comprendidos entre 2.5 y 3.3.

El tamaño máximo del agregado a emplear dependerá del espesor de la capa a aplicar, del diámetro de las barras de armado o de la malla de refuerzo, así como del tipo de técnica de proyectar que se utilice. Todas las partículas de tamaño superior al máximo deben eliminarse por tamizado con el fin de evitar obstrucciones en la manguera o en la boquilla.

Los aditivos son a veces totalmente necesarios en estos concretos, especialmente cuando se trata de reducir el rebote o rechazo, obtener resistencias iniciales altas y lograr una buena impermeabilidad en capas de reducido espesor. Los principales aditivos empleados son los cohesionantes, los aceleradores de fraguado, los aireantes y los reductores de agua.

Los aditivos pueden adicionarse en estado líquido o sólido en polvo. Generalmente, en el proceso de proyección por vía seca se emplean los aditivos en polvo adicionados a la mezcla de cemento o en estado líquido añadidos al agua que se incorpora en la boquilla; en el proceso por vía húmeda se utilizan en estado líquido disueltos en el agua de amasado, excepto los acelerantes que se adicionan en la boquilla.

Los acelerantes son prácticamente imprescindibles, si bien se deben tener en cuenta que la eficacia de éstos depende de la composición química en cuanto a aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico del cemento que se esté utilizando y de la temperatura de aplicación. Siempre que existan armaduras se evitará que estos acelerantes contengan cloruros; es conveniente emplear los que usan aluminatos y silicatos.

Pueden emplearse también emulsiones de polímeros (látex) acrílicos, estireno-butadieno, epoxi, etc.

Se pueden utilizar como adiciones puzolanas naturales, cenizas volantes, microsílíce, etc., siempre que estas adiciones mejoren las características de la mezcla y no introduzcan ningún efecto contraproducente en las resistencias mecánicas, en la estabilidad de volumen o en la durabilidad.

En algunas utilizaciones concretas puede ser interesante incorporar a la mezcla o proyectar fibras de acero o plásticas, generalmente de polietileno, siempre que mediante ensayos previos se demuestre que mejoran determinadas características, como las resistencias a flexión, tracción, impacto, desgaste o se disminuya el peligro de fisuración.



Cuando se empleen fibras de acero es conveniente aumentar el contenido de cemento de la mezcla en un 20 %, no emplear agregados de tamaño máximo superior a 10 mm y limitar la cantidad máxima de fibras el 5% sobre el peso del concreto fresco. Una cifra normal es 3%.

Si por las características del medio se presentan acciones corrosivas fuertes sobre fibras pueden emplearse fibras de acero galvanizado o terminar las aplicaciones con una capa proyectada de concreto sin fibras de 2 cm de espesor.

En aplicaciones refractarias se utilizan fibras de acero inoxidable. En muchas aplicaciones se incorporan a las capas proyectadas una malla electrosoldada de acero que puede estar formada por redondos de 5 mm de diámetro separadas de 100 a 150 mm, que deben estar situadas a unos 2.5 cm de la superficie del concreto y se posicionan o fijan por medio de espaciadores y anclajes.

A veces se emplea también en sustitución de la malla electrosoldada telas de gallinero y en otras ocasiones para evitar la mano de obra nada despreciable que supone la colocación de mallas se emplean fibras de acero o de polipropileno incorporadas a la mezcla que se proyecta.

La puesta en obra de este tipo de concretos o morteros debe realizarse sobre una superficie que previamente haya sido preparada, eliminando todo el concreto débil, suelto o contaminado, así, en el caso de un concreto débil atacado con agentes químicos debe procederse a la eliminación de la capa alterada, al igual que ocurre en el caso de un concreto que ha estado sometido a la acción de un incendio y las temperaturas alcanzadas han mermado sus resistencia.

Después del saneado del concreto debe procederse a eliminar el polvo existente en las superficies por medio de agua a presión, a saturar las superficies sobre las que se ha de realizar la aplicación con agua al menos durante seis horas, pero sin que en ningún caso éstas se encuentren encharcadas o mojadas.

La primera capa a lanzar conviene que sea rica en cemento y con agregado fino para crear una capa colchón sobre las que se harán las sucesivas proyecciones. Esta técnica tiene por finalidad reducir el rechazo de agregado grueso que se produciría si se proyectase directamente sobre la superficie de concreto.

Debido a las buenas propiedades de los concretos y morteros lanzados son preferibles a los concretos tradicionales en muchos trabajos de reparación, presentando una relación eficiencia/costo mayor con respecto a éstos en aplicaciones de hasta 150 mm de espesor.

El concreto o mortero lanzado se caracteriza por su buena adherencia sobre distintos materiales como muros de ladrillo, mamposterías de piedra, planchas de acero, concreto, etc. (sobre concreto cuando las superficies están bien preparadas se consigue prácticamente monolitismo) y su excelente compacidad consecuencia de la alta velocidad con la que se proyecta sobre el soporte que lo recibe y la baja relación agua/cemento que emplea, lo que se traduce en una mejora importante de las resistencias e impermeabilidad. Otra de las ventajas de este concreto o mortero es la facilidad de su puesta en obra en capas de mínimo espesor sin precisar cimbras o moldes; que estas aplicaciones pueden realizarse sobre superficies con cualquier ángulo de inclinación e incluso sobre techos. Cuando la aplicación se realiza sobre elementos estructurales se sección rectangular, como pueden vigas o pilares, se emplean solamente unos limitadores de esquina con el objeto de perfilar éstas.

El espesor de las capas proyectadas es reducido oscilando entre los 3 a 5 cm. Debiendo emplearse varias capas superpuestas cuando se requieren espesores mayores. El concreto lanzado permite economizar una gran cantidad de cimbra y en su aplicación se emplea un equipo de fabricación y colocación relativamente reducidos.

En los últimos años se está incorporando látex de polímeros a dichos materiales reduciéndose el agua de su mezcla y consiguiéndose con estos además de mejorar la adherencia, resistencias e impermeabilidad, aunque con el inconveniente del mayor costo de su empleo.

Las características resistentes dependen mucho del tipo y dosificación de cemento empleado, de la relación agua/agregado y de la relación agua/cemento.

Las dosificaciones normales de cemento suelen estar comprendidas entre 300 y 500 kg/m<sup>3</sup>, las relaciones cemento/agregado, en peso, entre 1/3 y 1/4 y las relaciones agua cemento entre 0.40 y 0.55. Las resistencias conseguidas a los 28 días oscilan entre los 200 y los 500 kg/cm<sup>2</sup>.

Los concretos y los morteros lanzados encuentran un amplio campo de aplicación en la reparación de estructura dañadas por el fuego, en estructura que presentan daños por corrosión de armaduras, en aquellas donde es difícil colocar el concreto dentro de una cimbra por existir poco espacio como ocurre, por ejemplo, en el recrecido de un pilar o viga, en estructuras dañadas por corrosión del tipo químico, en las dañadas por acción del hielo, abrasión como canales y presas.

## VII.9. AGREGADO PRECOLADO

El agregado precolado es un proceso de dos pasos. El primer paso, involucra la colocación del agregado en la cavidad durante el montaje del molde. El agregado se somete a una granulometría escalonada y se lavan todos los finos. La relación de huecos de la cavidad, después de que el agregado es colocado, varía de 40% a 50%. El segundo paso, involucra el bombeo de una lechada altamente fluida a través de la cimbra y en el agregado precolado. El flujo de la lechada llena los huecos inferiores y progresivamente llena la cavidad, fluyendo eventualmente a puertos de elevación más altos. Después de que la lechada fluye desde los puertos adyacentes, se desconecta la manguera de la lechada del puerto que está siendo bombeado, y se conecta otra vez al puerto que muestre un nuevo flujo. El proceso continúa hasta que la cavidad está llena y presurizada. El flujo de la lecha hace contacto con el sustrato preparado a medida que se llena la cavidad, proveyendo un íntimo contacto y adherencia. Una ventaja única de este método es la baja contracción por secado del material de reparación, debido al contacto punto por punto entre los agregados. El contacto del agregado restringe el cambio de volumen de la lechada de cemento a medida que ocurre la contracción por secado. Pueden usarse varias lechadas para el proceso de reparación. Las lechadas más populares son las lechadas de base de cemento portland y, para aplicaciones especiales las resinas epóxicas.

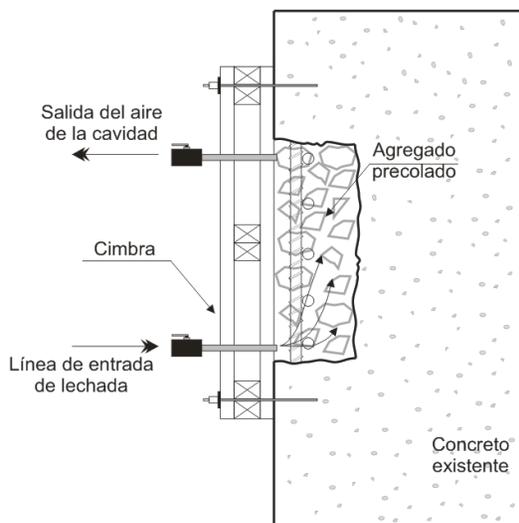


Figura VII.17. Método de reparación de superficies por la técnica de agregado precolado.

## VII.10. CIMBRA Y BOMBA

La técnica de cimbra y bomba se usa para aplicaciones verticales y horizontales. Esta técnica es una alternativa para el concreto lanzado, la colocación manual y las técnicas de agregado precolado y lechadas.

El método de reparación de cimbra y bomba es un proceso en dos pasos que consiste en bombear el material de reparación a la cavidad entre el molde o cimbra y el concreto existente. La técnica de cimbra y bomba permite el uso de muchos materiales de reparación diferentes. El requisito necesario para la selección del material es la bombeabilidad, particularmente del tamaño del agregado. Previamente a la construcción de la cimbra, deben recortarse y emparejarse todas las superficies que puedan hacer que el aire quede atrapado durante el proceso de bombeo y deben instalarse tubos de ventilación. Los materiales de reparación se mezclan y se bombean dentro de la cavidad confinada. La secuencia del bombeo se hace desde los puntos bajos hacia los puntos altos, y cuando se hacen trabajos a una altura por encima de la cabeza, desde un extremo al otro. Cuando la cavidad está llena, se ejerce presión de bombeo en el molde, haciendo que el material de reparación se consolide y ponga en contacto íntimo y procure la adherencia con la superficie de concreto existente.

La técnica de cimbra y bombeo ofrece muchas ventajas sobre otros sistemas alternos, tales como concreto lanzado, colocación manual y agregado precolado e incluye:

- El uso de casi cualquier material para reparación desde los morteros granulados hasta concreto con adiciones, agregados especiales o materiales de cemento hidráulico.
- La colocación no está limitada por la profundidad de reparación o por el tamaño o densidad del refuerzo expuesto.
- Los materiales de reparación son premezclados y colocados para proporcionar una sección transversal uniforme sin segregación o líneas intermedias de adherencia.
- El proceso no depende de una lucha contra las fuerzas de gravedad; todos los materiales están soportados por moldes durante la colocación y el proceso de curado.
- El proceso de presurización consolida el material de reparación, procurando la adherencia entre el material y el agregado.
- Es más fácil proveer el aseguramiento de la calidad de la reparación en la obra, ya que no está sujeto a errores de operación individual.

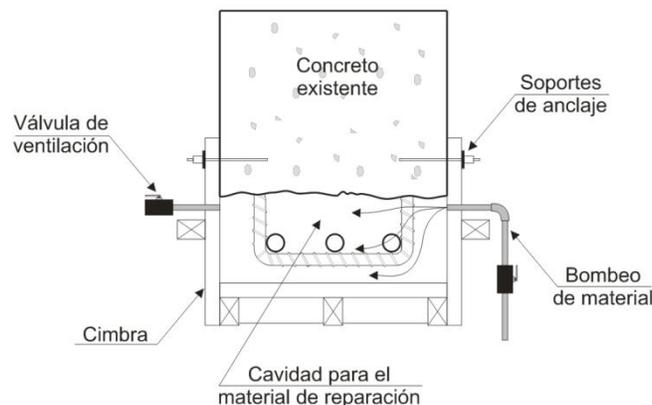


Figura VII.18. Método de reparación de superficies por la técnica de cimbra y bomba.

### VII.10.1. CIMBRA

La cimbra debe acomodar el peso y la presión del material de reparación. El diseño de las cimbras debe seguir la práctica estándar para la fabricación del concreto colado en obra, excepto en lo que respecta al cálculo de la presión en la cimbra. La presión de la cimbra debe diseñarse para un máximo de 96.5 kPa. El máximo de presión que se ejerce sobre la cimbra ocurre después de que la cavidad de la cimbra está llena y presurizada. La cimbra se fija mejor directamente a la superficie de concreto con anclas de expansión o amarres estándar para cimbras. Todas las anclas deben ser precargadas para evitar que resbalen durante la colocación del concreto. En algunas ocasiones puede usarse apuntalamiento o andamiaje para soportar la cimbra. Las cimbras deben ser construidas para que se ajusten perfectamente a la superficie de concreto existente. Los empaques de espuma premoldeados o la espuma colada en el sitio son efectivos para manejar superficies, a fin de darles una forma exacta. La fijación de la manguera de la bomba a la cimbra se logra por medio de varias técnicas, incluyendo aditamentos de plomería y válvulas de bola.

### VII.10.2. COLOCACIÓN

La secuencia de la colocación del material en la cavidad moldeada depende de la geometría involucrada. Las superficies verticales empiezan en el punto más bajo, llenándose de tal manera que se evite que el aire quede atrapado. El arreglo de los puertos para los aditamentos de las líneas de bombeo generalmente es horizontal, con espaciamiento de 90 a 120 cm en forma de parrilla. El bombeo ocurre inclusive después de que ocurre el flujo del material desde los puertos adyacentes, a fin de expeler el aire. Cuando el flujo se cierra temporalmente, el puerto también se cierra y la línea de bombeo se conecta al puerto adyacente que ya ha visto el flujo. La secuencia continua hasta que se llena la cavidad. En algunas condiciones, la cavidad puede ser bombeada desde un puerto. En esta situación, cada puerto adyacente es taponado cuando ocurre el flujo. Es necesario monitorear la presión de la línea de bombeo para evitar excesivas presiones de reacción al bombear largas distancias. Una vez que la cavidad está llena, la presión de la línea es capaz de presurizar la cavidad moldeada.

Las colocaciones a una altura por encima de la cabeza se logran empezando en una extremidad de la superficie y avanzando de una manera similar a las colocaciones verticales. Las reparaciones que involucren planos y caras verticales de los miembros pueden combinarse en una sola colocación. En este caso, la colocación empieza en la elevación más baja y continúa según el procedimiento detallado más arriba para cada orientación. Las grandes áreas de las reparaciones deben ser divididas en secciones utilizando tablas de contención. Los entablonados de contención pueden ser construidos del material de reparación y pueden dejarse en el lugar. Al utilizar los entablonados de contención y volúmenes de colocación manejables se limita el riesgo de problemas asociados con las grandes colocaciones y permite que ocurra presurización en duraciones más cortas que el mezclado del material.

El problema más común asociado con las reparaciones hechas con cimbras y bomba es la falta de presurización de la cavidad moldeada, que puede dar como resultado áreas sin el material de reparación o pobre adherencia. Al completarse la reparación de la superficie (después de la cimbra ha sido removida) las superficies deben ser sondeadas con un martillo para localizar áreas que pudieran no estar adheridas o que pudieran contener vacíos.

## VII.11. REPARACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Si es necesario hacer reparaciones al acero de refuerzo, la varilla puede ser reemplazada completamente o se puede colocar una varilla complementaria sobre la sección afectada. Las varillas complementarias se pueden empalmar mecánicamente con las varillas antiguas o colocar en forma paralela a las varillas existentes, aproximadamente 6 mm a partir de estas últimas. Las longitudes de traslape se determinarán de acuerdo con el ACI 318.

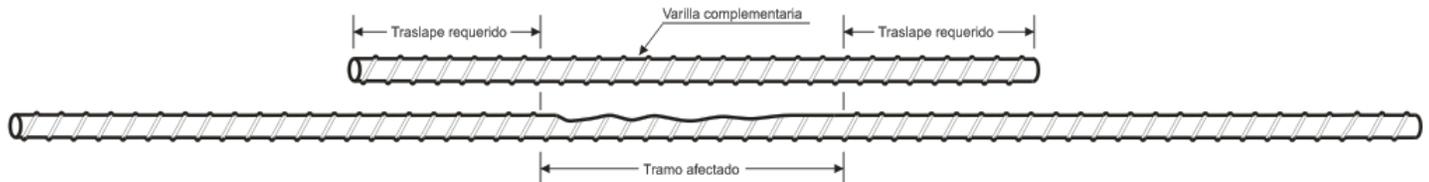


Figura VII.19. Si se requiere reparaciones para el acero de refuerzo se puede reemplazar completamente la varilla o colocar una varilla complementaria sobre la sección afectada.

## VII.12. REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS MEDIANTE ACERO

Cuando se requiere de una capacidad adicional debido a esfuerzos cortantes, para resistir esfuerzos de penetración, con frecuencia se usan las siguientes técnicas:

- Agrandamiento de la sección de la columna.
- Collares de cortante de acero o compuestos adheridos.

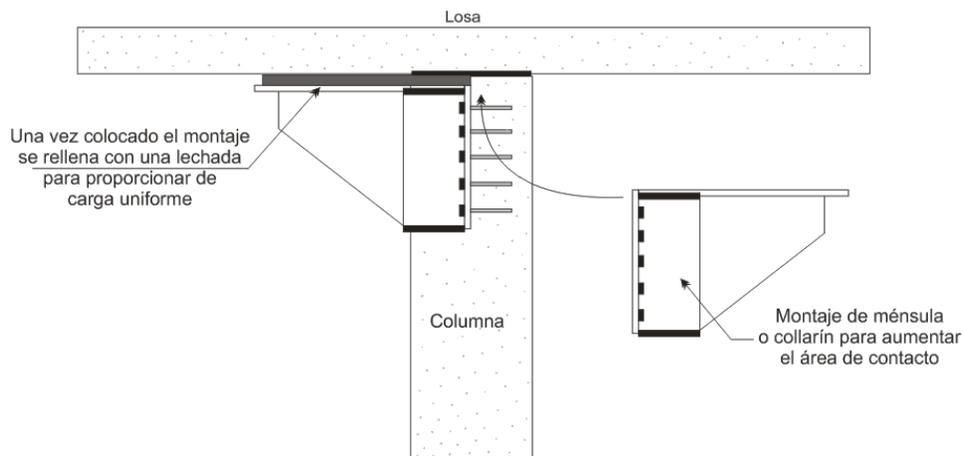


Figura VII.20. Reforzamiento de la capacidad cortante usando ménsulas o corralarines para aumentar el área efectiva efectiva de transferencia de carga.

Existen varias juntas dentro de una estructura, incluyendo las que están en las conexiones de vigas columnas. Estas conexiones deben estar libres para girar, expandirse y contraerse. Si la conexión falla en permitir estos movimientos, o los elementos estructurales de apoyo llegan a estar excesivamente esforzados, se hace necesaria la reconstrucción. Hay varias técnicas disponibles para esta reconstrucción, incluyendo:

- Reconstrucción de la ménsula.
- Columna corta a compresión (pedestal).

- Suspensor puntal en tensión.
- Asiento de cortante.

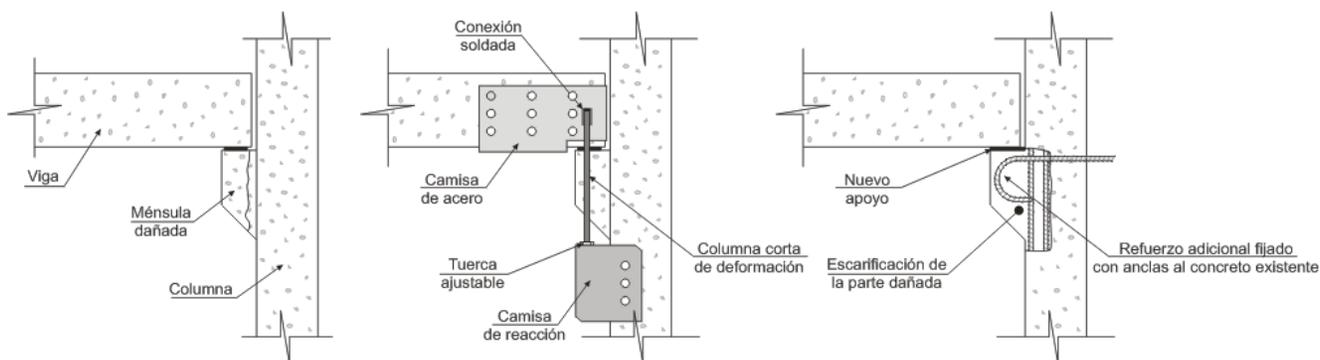


Figura VII.21. Reconstrucción de una ménsula deficientemente diseñada o defectuosa.

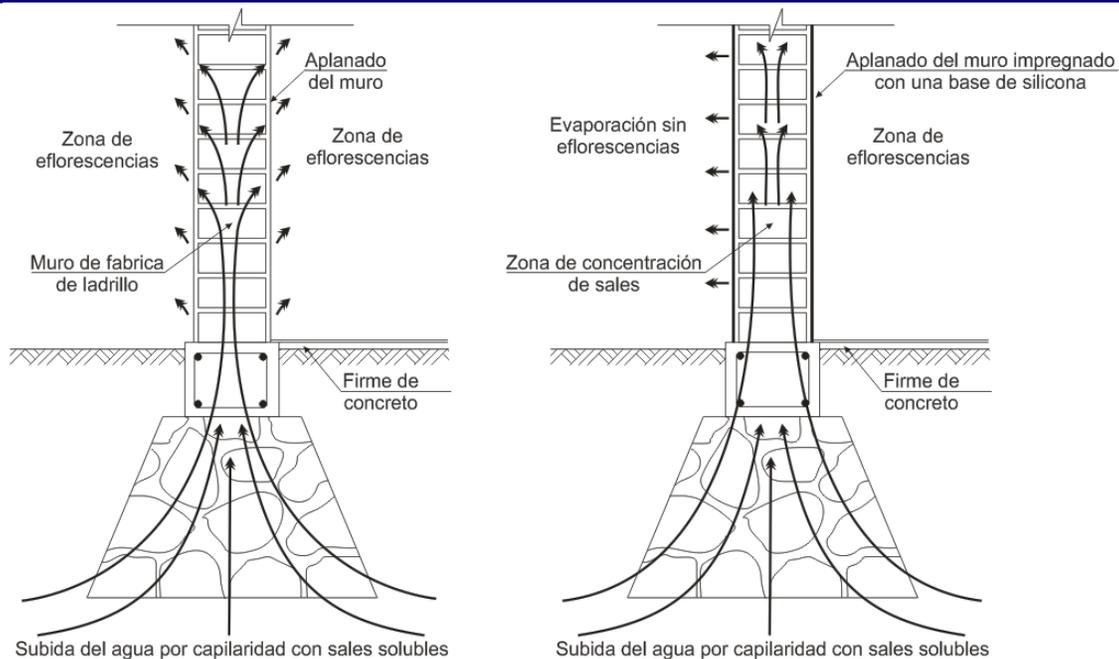
### VII.13. PREVENCIÓN AL ATAQUE DE SULFATOS

Para evitar la aparición de este tipo de agresiones, es recomendable utilizar materiales adecuados al lugar donde vayan a emplearse. Por ejemplo, al construir una obra de fábrica en donde la construcción está en contacto con el terreno, supuesto portador de humedades, deben utilizarse materiales cuyos índices de contenido de sulfatos sea muy bajo o nulo. Y en todo caso debe evitarse el empleo de morteros ricos en cemento portland, ya que su masa tendría un elevado porcentaje de sulfatos en su composición.

La figura VII.22 muestra dos esquemas de la relación humedades-eflorescencias. A la izquierda el gráfico ofrece el caso de la subida del agua cargada de sales solubles por el muro, que se infiltra en los paramentos exteriores para formar dos zonas de eflorescencias. La ilustración a la derecha representa el mismo muro protegido de la intemperie con una impregnación a base de siliconas para conseguir una barrera hidrófuga. El agua ascendente con sales disueltas no puede salir al exterior, ya que es rechazada, pero si puede atravesar la barrera las moléculas de agua en forma de vapor, así como las de los componentes del aire, ambas traspasarán el muro desde dentro hacia el exterior. Pero como el agua no lo hace en estado líquido, las sales solubles que llevará en disolución quedarán retenidas en el interior del muro, que podrán ponerse en contacto con el aire exterior, no cristalizándose y, en consecuencia, no se producen las eflorescencias.

La clasificación de la severidad de exposición a los sulfatos recomendada por el ACI 201.2R se muestra en la tabla VII.3.

El propósito de la clasificación de la severidad a exposición a sulfatos mostrada en la tabla VII.3 es para seguir medidas de prevención en estructuras de concreto. Se puede emplear dos soluciones: la primera es reducir al mínimo el contenido de  $C_3A$  del cemento, es decir, utilizar cemento resistente a sulfatos. La segunda solución es reducir la cantidad de  $Ca(OH)_2$  de la pasta de cemento hidratado mediante el uso de cementos mezclados que contengan escoria de alto horno o puzolana. El efecto de la puzolana es doble, primero reacciona con el  $Ca(OH)_2$ , de modo que el  $Ca(OH)_2$  ya no está disponible para reaccionar con los sulfatos; y segundo, comparado con cemento portland, el mismo contenido de cemento mezclado por metro cúbico de concreto da por resultado menos  $Ca(OH)_2$ . Estas medidas son útiles, pero es más importante la prevención del ingreso de sulfatos dentro del concreto: esto se logra haciendo el concreto tan denso como se pueda y con la permeabilidad tan baja como sea posible. Esto nunca se debe olvidar: por ejemplo, el uso de concreto pobre en los apoyos, la cimentación o alcantarillas produce partes vulnerables en una construcción que posiblemente sería durable de otro modo.



**Figura VII.22.** Comportamiento de las humedades ascendentes, cargadas de sales solubles, ante un muro desprotegido (a la izquierda), con aparición de eflorescencias y un muro impermeabilizado a base de siliconas (derecha) que impide la formación de las mismas.

Exposición	Concentración de sulfatos (SO <sub>4</sub> ) solubles	
	En el suelo (%)	En el agua (ppm)
Suave	< 0.1	< 150
Moderada	0.1 a 0.2	150 a 1,500
Severa	0.2 a 2.0	1,500 a 10,000
Muy severa	> 0.2	> 10,000

**Tabla VII.3.** Clasificación de la severidad del ambiente de sulfatos de acuerdo con el ACI 201.2R.

En lo que concierne a la selección del cemento, el ACI 201.2R, recomienda para exposición moderada, el empleo de cemento portland mezclado con escoria de alto horno o puzolana. Para exposición severa el cemento resistente a sulfatos es la preferida, para exposición muy severa, se requiere una mezcla de cemento resistente a sulfatos y puzolana (entre 25 y 40 por ciento por peso del material cementante total) o escoria de alto horno (no menos de 70 por ciento por peso) probada para mejorar la resistencia a los sulfatos.

También un curado con vapor de agua a alta presión mejora la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos. Esto se aplica a concretos hechos tanto con cemento resistente a sulfatos como con cemento portland ordinario.

## VII.14. REALCALINIZACIÓN DEL CONCRETO

Cuando el concreto se carbonata a lo largo del tiempo, ocurre un descenso de su alcalinidad, lo cual conlleva a la corrosión generalizada del refuerzo. Una alternativa para retrasar esta situación es la realcalinización del concreto. Esta consiste en colocar una solución rodeando al concreto que se pretende alcalinizar. Dicha solución debe estar hecha a base de carbonato de sodio que proporciona un gradiente de concentración hacia el interior del concreto inyectándole elementos que propician la realcalinización del concreto. Existen varios mecanismos para lograr esta realcalinización siendo la absorción la más redituable, sobre todo si el concreto está seco o es muy poroso.

### VII.14.1. REMOCIÓN DE CLORUROS

Cuando el concreto está en un ambiente marino, la concentración de cloruros en el interior puede provocar la despasivación del refuerzo. Una técnica moderna no destructiva para rehabilitar la estructura consiste en remover a los cloruros del concreto. Al igual que en el caso anterior, se puede colocar un electrolito alrededor del elemento al cual se le piensa hacer la remoción de cloruros. Este electrolito puede ser agua. Los cloruros podrán salir por un gradiente de concentración mediante un proceso bastante lento que puede acarrear otros iones. El proceso se ilustra en la figura VII.23 y, al igual que la técnica anterior, es muy promisoriosa, pero hay aún muchas limitantes que tienen que tomarse en cuenta antes de decidir su aplicación.

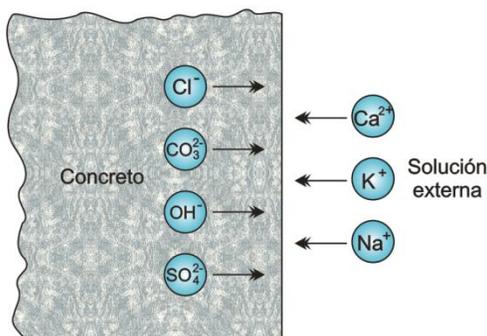


Figura VII.23. Proceso de transporte de iones por electromigración durante una remoción de cloruros.

### VII.14.2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que al disolverse en el electrolito, junto a la superficie del metal, reduce la velocidad de corrosión mediante algún mecanismo definido. A los inhibidores se les atribuye algunas veces, la función de manutención de la capa pasiva, impidiendo la disolución de los iones metálicos en el agua intersticial del concreto. Los inhibidores se absorben en la superficie de la armadura, reaccionando y formando una capa protectora de óxidos. Así se cree que el mecanismos de acción de los inhibidores se acercan más a la absorción de sus iones sobre el metal que a la influencia de los compuestos provenientes de reacciones.

Los inhibidores de corrosión pueden ser de tres tipos:

- Anódicos.
- Catódicos.
- Mixtos.

Los anódicos actúan controlando las reacciones anódicas a través de la formación de una capa protectora de óxido de hierro sobre el metal y disminuyendo así la corrosión. Los catódicos desplazan el potencial de corrosión hacia la dirección más negativa y los mixtos interfieren tanto en las reacciones anódicas como en las catódicas. En general los inhibidores se emplean como métodos de prevención añadiéndose en el agua de amasado, sin embargo, la comunidad científica continúa preguntándose si los inhibidores estarán ahí cuando se les necesite. Ahora bien, recientemente ha cobrado auge la utilización de inhibidores migratorios como método de reparación, sin embargo, aún queda duda sobre la eficacia por lo que debe tenerse precaución cuando se decida utilizarlos de esta manera.



### VII.14.3. PROTECCIÓN CATÓDICA

Sin duda uno de los métodos más efectivos para proteger al concreto armado es la protección catódica. Esta protección es una técnica electroquímica utilizada para proteger el acero de refuerzo embebido en las estructuras de concreto. Este método es el único que ha demostrado reducir o desaparecer la corrosión. Este método se emplea en estructuras expuestas a la atmósfera, así como también a las expuestas en ambientes marinos. Es empleado principalmente para rehabilitar estructuras expuestas a cloruros. Además de ser utilizado como método de reparación, actualmente estos sistemas se colocan desde la construcción de estructuras ya sea para aplicar corriente desde el inicio (prevención catódica) o para activarlo al momento de que se alcance una cantidad determinada de cloruros.

Este tipo de sistema tiende a ser económicamente atractivo si el área a tratar es grande asumiendo que el sistema se instaló correctamente, este método no depende del estado del concreto no removido. Un punto que es importante de resaltar es el hecho de que el proceso por el cual la protección catódica tiene lugar en estructuras de concreto reforzado, aun no se obtiene un entendimiento detallado de los mecanismos involucrados. Dando por resultado que los criterios de protección sean muy debatidos aún hoy en día.

La mayoría de los sistemas de protección catódica son diseñados con el principio de obtener un desplazamiento a potenciales más negativos con respecto a un valor absoluto o una cantidad específica. En el caso del concreto armado, esta protección reduce el gradiente de potencial a través de la capa pasiva del acero lo cual disminuye el riesgo de que se rompa dicha capa y promueva la reaparición de áreas dañadas.

La protección catódica puede aplicarse a casos o estructuras especiales (por ejemplo estructuras marinas) con un buen resultado. Sin embargo, se debe tener cuidado de no aplicar potenciales muy negativos debido al riesgo de evolución de hidrógeno.

La protección catódica puede ser por corriente impresa o por ánodo de sacrificio.

- Protección catódica por corriente impresa. La protección catódica por medio de corriente impresa se puede describir de la siguiente manera: Se aplica una corriente directa a través del concreto desde el ánodo, usualmente colocado en la superficie del concreto y conectando éste a la terminal positiva de una fuente de voltaje (de voltaje directo bajo) y el acero de refuerzo que trabaja como un cátodo a la terminal negativa.

Existe una gran variedad de protección catódica por corriente impresa que emplean este sistema. Se ha probado diferentes tipos de ánodos (uno de los más populares es el de la barra de titanio con óxido de otros metales) así como de rellenos. Los mejores sistemas tienen una vida promedio de 20 a 25 años.

- Protección catódica por ánodos de sacrificio. También conocida como protección galvánica. El lugar de utilizar una fuente de poder y un ánodo inerte, el ánodo debe ser menos noble que el cátodo (la armadura a proteger), como el aluminio, magnesio o zinc. Al corroerse este ánodo se genera la corriente eléctrica requerida para proteger el acero. Uno de los atractivos de la protección catódica por ánodos de sacrificio es que no es necesaria una fuente de poder. Esto hace que sea más barato diseñar, instalar y operar. El ánodo se instala con una conexión al acero. Este método requiere de una supervisión mínima. Sin embargo, la corriente producida no es siempre suficiente para polarizar el acero. Otro punto importante es que necesita reemplazarse con mayor frecuencia que un sistema por corriente impresa.

---

#### **VII.14.4. EFECTOS BENÉFICOS INDUCIDOS POR LA PROTECCIÓN CATÓDICA**

La corriente que circula entre una estructura anódica y otra catódica a través del un electrolito produce efectos de protección principalmente en conexión al desplazamiento del potencial de la estructura catódica en la dirección negativa (éste es un efecto primario).

El proceso catódico (generalmente reducción de oxígeno y si se alcanza un potencial bastante negativo, evoluciona en hidrogeno) reduce la cantidad de oxígeno y produce alcalinidad en la superficie del acero de refuerzo. Estos efectos son benéficos para obtener y prevenir la corrosión ya que éstos amplían la región pasiva y despolarizan el proceso catódico. En caso de que el acero no se esté corroyendo, estos efectos reducen (o desaparecen) acidificaciones locales y también interfieren con la iniciación de picaduras (efecto buffer).

Por otra parte, dentro del concreto, la corriente es transportada por iones proporcionalmente a su concentración y movilidad. Iones positivos en la misma dirección de la corriente, esto es, del ánodo al cátodo, los negativos en la dirección opuesta. Así, en concreto contaminado con cloruros, la corriente que circula produce un flujo de cloruros del cátodo al ánodo. En otros tipos de electrolitos, las consecuencias de la migración electrosmotica son minimizadas por el fenómeno de difusión o conversión. En concreto esta migración no es despreciable si la protección catódica opera a corriente relativamente altas. En estos casos la circulación de corriente da como resultado una reducción de contenido de cloruros en la superficie del acero o en una reducción de los cloruros que ingresan al concreto formando una barrera.

Mientras que al reducir el potencial inmediatamente produce su efecto benéfico, el cual cesa si la corriente se interrumpe. Los cambios de composición en la superficie producido por las reacciones catódicas o por la migración de especies iónicas dentro del concreto pueden no tener consecuencias inmediatas, pero por otra parte, pueden prever una protección prolongada.

#### **VII.14.5. CONTRIBUCIONES NEGATIVAS**

Hay que tener en cuenta los posibles efectos negativos inducidos por la protección catódica ya que estos pueden degradar al concreto, la adhesión del concreto-acero y la fragilidad del acero por hidrogeno.

- Degradación del concreto. Teóricamente el aumento de la alcalinidad alrededor del refuerzo puede causar daños si el concreto contiene agregados que reaccionen a los álcalis.
- Pérdida de adherencia. A potenciales muy negativos (esto es a densidades de corrientes altas), la pérdida de adherencia entre la barra y el concreto puede ocurrir.
- Fragilidad por hidrógeno. El efecto más negativo es la fragilidad del acero causado por átomos de hidrógeno. Este es más propenso en acero de alta dureza (mayor de 700 MPa) utilizados en construcciones pesadas, si el potencial es desplazado a valores en los cuales la evolución del hidrógeno puede tener lugar parte del hidrógeno que se forma puede entrar en estos aceros haciendo posible este fenómeno. El valor crítico de potencial es de -950 mV en ambientes alcalinos.



### VII.14.6. IMPREGNACIÓN CON POLÍMEROS

En puentes en donde se emplean sales, generalmente cloruros, para el deshielo existe el peligro potencial de fuerte corrosión de armaduras debido a la penetración de los iones de cloro dentro de la masa del concreto de recubrimiento de las armaduras. El peligro de corrosión puede reducirse de manera significativa a la vez que el concreto se hace más impermeable mediante una protección superficial profunda realizada por medio de polímeros o copolímeros de metacrilato de metilo.

Con estos mismos materiales pueden repararse concretos de baja resistencia o que presenten una alta porosidad a haber empleado en ellos alta relación agua/cemento. En algunos casos se ha incrementado mediante la impregnación con metacrilato de metilo la resistencia de un concreto desde 50 a 200 kg/cm<sup>2</sup>.

Los pasos a seguir en la aplicación de esta técnica consisten en un secado del elemento que puede realizarse a 140°C durante el tiempo necesario de acuerdo con la humedad y volumen; enfriando a 20 o 30°C; impregnación con el monómero durante cinco o más horas y polimerización con calor a 80°C entre una y tres horas.

La impregnación puede realizarse después de haber sometido al elemento a impregnar a un tratamiento de vacío (técnica complicada) o sometiendo a presión el monómero para que entre en la red capilar del concreto, o bien mediante otros sistemas.

El monómero a emplear es metacrilato de metilo debido a su adecuada tensión de vapor, baja viscosidad, elevada temperatura de transición vítrea, etc., aunque también podrían emplearse en algunos casos, estireno. Cada monómero empleado debe ir acompañado de la dosis precisa de su correspondiente iniciador, que en el caso del metacrilato de metilo puede ser peróxido o benzoilo.

### VII.15. ENCOLADO DE BANDAS DE ACERO CON RESINAS EPOXI

Este sistema de refuerzo consiste en encolar a un elemento de concreto armado y en el lugar adecuado, una banda de acero de sección conveniente mediante un adhesivo especial de naturaleza epóxica en forma de masilla.

Esta es una técnica muy empleada en el refuerzo de elementos sometidos a flexión, cortante o torsión. Con ésta se pueden resolver problemas de deficiencia en la cantidad de acero de armado motivadas por errores de proyecto o de ejecución, o bien aumentar la capacidad resistente del elemento que debe trabajar a sobrecargas superiores a las consideradas en el proyecto inicial.

Este sistema tienen sus limitaciones, entre las cabe destacar que no puede emplearse con concreto de resistencia inferior a 180 kg/cm<sup>2</sup> y que no puede conseguirse aumentos en la capacidad resistente a flexión superiores al 50% de la existente.

Los requisitos necesarios para hacer posible este tipo de refuerzos son los siguientes:

- Una adherencia excelente entre la masilla epoxi, el concreto y el acero; lo que exige que la masilla tenga características determinadas, y tengan que darse condiciones especiales de reparación superficial en el acero como en el concreto.

- En el concreto hay que eliminar todas las partes débiles y contaminadas, como lechada superficial, aceites, grasas etc., mediante chorros de arena, agua a presión, cepillado de alambre, etc., así como el polvo que haya podido formarse. En el acero, hay que eliminar el óxido, escamas de laminado, aceites, grasas, etc., mediante ataque ácido o mejor aún mediante chorro de arena.
- Si las vigas se encuentran fisuradas es conveniente inyectar previamente las fisuras si el ancho de las mismas es superior a 0.2 mm.
- No deben emplearse espesores de la capa de unión de masilla epoxi superiores a 1.5 mm. Igualmente el espesor de la banda de acero utilizada no debe ser superior a 3 mm, salvo que se empleen elementos adicionales de anclaje, en cuyo caso se podrá llegar, dependiendo de la capacidad de absorción de esfuerzos cortantes en los anclajes hasta los 10 mm.
- Haya que presionar la banda de acero de refuerzo contra el concreto una vez aplicada la masilla epoxi. La presión puede realizarse por medio de puntales telescópicos o de tornillos, ésta debe ser uniforme al menos durante las primeras 24 horas, dependiendo de la reactividad de las resinas empleadas y de la temperatura ambiente.
- Finalmente, la parte reforzada del elemento estructural de debe proteger frente a los cambios de temperatura y especialmente contra el fuego, mediante una capa de vermiculita, perlita o cualquier material aislante térmico y a la que se incorporará una tela de alambre.

Otra forma de realizar este tipo de refuerzos consiste en sujetar la banda de acero por medio de tornillos o pernos y después inyectar la masilla epoxi en el hueco existente entre la banda de acero y el concreto. Este sistema, aunque más complicado de llevar a cabo, tiene la ventaja de eliminar las posibles burbujas de aire en la capa de unión.

Cuando el control de calidad es satisfactorio se consiguen muy buenos resultados con esta técnica de reparación y refuerzo.

El factor decisivo en el dimensionamiento de las bandas a encolar a elementos de concreto armado, especialmente vigas, es la resistencia a cortante en el extremo de las bandas; esto provoca que al no poder aprovechar toda la capacidad resistente a tracción de la sección de acero, por venir agotada por el agotamiento por cortante, se limite el espesor de las bandas a 3 mm, al menos que se empleen sistemas especiales de anclaje.

## **VII.16. INYECCIÓN DE FISURAS**

Las formulaciones empleadas en la inyección de fisuras en el concreto son de dos componentes: una resina líquida, generalmente epoxídica con disolventes y un endurecedor. A veces se emplean resina de metacrilato de metileno de baja viscosidad que penetran por gravedad y capilaridad a profundidades reducidas que, en ocasiones, llegan a los 70 mm.

Cuando las fisuras tienen un ancho superior a 0.3 mm es conveniente inyectarlas o sellarlas con el fin de evitar de que por éstas penetre la humedad el oxígeno y otros agentes agresivos.

Cuando se trata de inyectar fisuras de espesor reducido (0.1 a 0.2 mm) se emplean formulaciones sin cargas de muy baja viscosidad, que penetran en las fisuras con presiones de hasta 10 kg/cm<sup>2</sup>. Si las fisuras son muy extensas las presiones a utilizar son mayores llegando a los 100 kg/cm<sup>2</sup>. En el caso de fisuras de mayor espesor es posible añadir a la formulación una carga para reducir la retracción, fluencia, fenómenos de origen térmico y dar tixotropía al sistema epoxi.



Si las fisuras a inyectar tienen un ancho comprendido entre 1.0 y 1.5 mm se puede emplear harina de cuarzo como carga y, arena fina en el caso de que el ancho de las mismas esté entre 4.0 y 5.0 mm. En cualquier caso el tamaño máximo del agregado no será superior al 50% del ancho mínimo de la grieta y nunca superior a 1.0 mm. La relación formulación/carga a emplear debe ser aproximadamente de 1:1.

Las formulaciones de resinas acrílicas o de poliéster pueden ser también empleadas en inyecciones si bien, en general, la adherencia con el concreto no es tan buena como la conseguida con las epoxídicas. En el caso de que exista humedad en el concreto cabe la posibilidad de utilizar formulaciones epoxi especiales.

La inyección de resinas epoxi es el método más eficaz para dar monolitismo a una estructura fisurada como lo demuestran los ensayos realizados y los resultados obtenidos extrayendo probetas testigo de las zonas inyectadas.

## VII.17. LESIONES MENORES

En un principio, las lesiones menores pueden referirse a defectos y fallos que se atienden, prioritariamente por razones estéticas, aunque el tratamiento corrector y protector de la obra suele acometerse, principalmente, para evitar que el daño se extienda o pueda degenerar en una lesión importante. El conjunto de medidas que se tomen al efecto, recibe el nombre genérico de «reparación» concepto que supone siempre la corrección de una situación anómala.

Para sistematizar el estudio, las lesiones menores de los edificios serán expuestas formando cuatro grandes grupos:

- Suciedades acumuladas por las condiciones ambientales y por el paso del tiempo.
- Erosiones y desmoronamientos superficiales en los paramentos exteriores.
- Defectos imputables a la obra de fábrica.
- Fallos en los acabados.

### VII.17.1. LIMPIEZA DE SUCIEDADES

Una operación de limpieza de la suciedad puede acometerse directamente atacando en seco la capa de suciedad por medio de procedimientos mecánicos, como por ejemplo, el cepillado con instrumento de púas de alambre de acero, el chorro de arena proyectada neumáticamente o por aire comprimido.

El sistema conocido es el que se basa en el bombardeo de la superficie a limpiar por medio de un chorro de arena o un material similar, que incide con fuerza sobre el paramento a limpiar, actuando a manera de abrasivo de gran impacto que va lijando, desgastando y rebajando la piedra. El proceso es delicado y lento, y por lo tanto costoso. Requiere la intervención de operarios altamente especializados, ya que la acción de los ácidos lanzados contra la fachada en tratamiento debe controlarse para evitar que puedan dañar el material que se está limpiando, con grandes consecuencias para la conservación de la construcción.

Por ello, se evidencia cada vez más la tendencia a utilizar sistemas fundados en el reblandecimiento de la capa de suciedad, a la que se emulsiona dándole un daño de impregnación con un producto adecuado, que facilite su desprendimiento del soporte. Con este tipo de procedimiento, la operación resulta más rápida y económica, al mismo tiempo que respeta al máximo la textura original de los materiales sometidos a limpieza.

Este tipo de sistemas denominados húmedos, combinan la acción del agua caliente lanzada a presión, con un enérgico cepillado mediante un cepillo de cerdas de nylon, que en ningún caso dañará los materiales, actuando sobre la superficie convenientemente preparada.

#### **VII.17.1.1. Fases del lavado de un paramento sucio**

La limpieza de una construcción por medio de un proceso húmedo, comienza con la impregnación de la misma con una solución jabonosa o con un detergente activo de mediana concentración. Existen preparados para esta finalidad, listos para su uso inmediato, constituido por una mezcla de diferentes productos, con la adición de una carga absorbente, cuya fórmula varía según cada fabricante. La aplicación se efectúa generalmente a brocha, para obtener una capa más o menos gruesa según el grado de suciedad que ofrezca la fachada.

Quando el baño de preparación comienza a secar, la operación continúa con un cepillado enérgico, que tiene la misión de desprender la suciedad ya ablandada, seguido de un lavado con agua caliente a alta presión (o de vapor), capaz de llegar al fondo de los poros y fisuras que tenga la superficie tratada. El agua arrastrará la suciedad desprendida, lavando a un mismo tiempo el soporte.

En el supuesto de la suciedad sea muy grave y se resista a desaparecer totalmente, se debe repetir la misma operación y en el mismo orden. El tratamiento se terminará con un lavado con agua abundante, que servirá para eliminar cualquier residuo que pudiera quedar retenido en los intersticios superficiales.

#### **VII.17.1.2. Productos que dañan la piedra**

Debe evitarse el empleo de ácidos, como por ejemplo el fluorhídrico diluido, que a veces se aplica para reblandecer la capa de suciedad, pero que dañan seriamente la superficie del paramento sometido a su acción, al formarse fluoruros alcalinos, productos muy agresivos, que pueden atacar al concreto, así como también a los ladrillos.

### **VII.17.2. REMOCIÓN DE MANCHAS**

Las manchas sobre el concreto provienen de muchas fuentes incluyendo el agua de curado y el acero embebido, así como las manchas o marcas ya existentes en la cara de la cimbra antes de que el concreto sea colado. Por supuesto, la prevención es mejor, pero algunas manchas parecen inevitables.

Planee con cuidado el procedimiento de limpieza y no intente eliminar las manchas hasta que éstas hayan sido identificadas. Experimente primero con las manchas localizadas en un área discreta. La remoción de las manchas puede cambiar la apariencia de la superficie, a menos que se tomen las precauciones. El cambio más leve en la superficie se logra con el fregado con soluciones fuertes de detergente, pero éstas son eficaces sólo para manchas superficiales y se deben aplicar tan pronto como sea posible.



Ejecute el fregado con detergentes para remover grasas, aceites, asfalto y materiales similares, en lugar de solventes, pues estos profundizan las manchas en el concreto.

Se pueden utilizar productos químicos específicos de acuerdo con la naturaleza de la mancha. El tratamiento actúa disolviendo la mancha o decolorándola o cambiando la mancha a algo que no se ve. Estos productos se pueden usar sólo después de haberse familiarizado con éstos y después de experimentar sobre superficies discretas, pues pueden cambiar las características de las superficies. Lave con chorro de agua la superficie luego de utilizar productos químicos. Existen métodos para la remoción de depósitos de sales, normalmente blancas, que emanan del concreto y se depositan en la superficie.

Si el fregado con detergente falla para eliminar la eflorescencia, trate con una aplicación de ácido muriático diluido en agua. Tome en consideración el cambio de apariencia que resulta por la corrosión de la superficie de concreto. Intente primero con soluciones débiles (menos del 5% por volumen) y no utilice soluciones más fuertes que el 10%. Moje totalmente la superficie de concreto antes de aplicar el ácido y lave con chorro de agua la superficie después de que han desaparecido las espumas, de otra manera pueden depositarse sobre el concreto un silicato blanco insoluble, particularmente con soluciones fuertes. Asegúrese de que la solución de ácido y agua limpia no entren en contacto con las superficies circundantes y subyacentes. Proteja a los trabajadores de la inhalación de vapores y quemaduras de ácido en la ropa, piel y ojos.

Los métodos mecánicos inusuales para la remoción de manchas son el sopleteado con arena, esmerilado, limpieza con vapor, cepillado y limpieza de óxido, pero no use cepillos de alambre porque depositan partículas metálicas en la superficie, que más tarde provocan manchas de óxido. El sopleteado ligero con arena es uno de los mejores métodos para eliminar las manchas en el concreto texturizado; sin embargo, puede ocurrir cierto desgaste de la superficie. El sopleteado con arena, aún en aplicaciones ligeras, descubre los defectos escondidos debajo de la superficie. Si selecciona este método, utilícelo en todas las superficies expuestas para conservar uniformidad en la apariencia. Las precauciones necesarias para el sopleteado con arena se consideran también para el lijado con disco flexible.

### VII.17.3. DISGREGACIÓN DE LA OBRA VISTA DE LADRILLO

En las fábricas de ladrillo, la descomposición del paramento es debida generalmente a defectos del mortero que reciben las piezas de la obra. Los fallos suelen residir en la mala dosificación del cemento, o en la insuficiente compactación que se ha hecho en las juntas, cuando no de ambas cosas a la vez. En consecuencia la superficie del mortero se meteoriza y comienza a desprender arena, abriendo camino al paso del agua, la cual es absorbida con facilidad por los ladrillos, con la consiguiente aparición de humedades.

Ante la aparición de tal defecto, no hay otra solución que picar las juntas del mortero que estén en mal estado, hasta alcanzar una profundidad mínima de 15 mm y llegar al material sano. La eliminación del mortero dañado puede hacerse manualmente por medio de cincel y martillo, o bien con la ayuda de un disco de amolar eléctrico. Independientemente se procede de rehundir con un chorro de agua a alta presión y aire comprimido.

La siguiente fase de la operación consistirá en rejuntar las piezas de ladrillo con un mortero especial prefabricado, concebido expresamente para realizar esta clase de trabajo. Se trata de un material de amasado que no sufre retracción al secar, y que sirve indistintamente para rejuntado de todo tipo de piezas de fábrica, ladrillos, piezas de hormigón o mampostería. Es conveniente amasar este mortero de rejuntado de manera

que no quede excesivamente seco, y aplicarla con una herramienta adecuada o una pistola de sellado.

Cuando el mortero enfermo alcanza más de 20 mm de profundidad, es aconsejable rellenar primero el fondo con una capa de 15 mm aproximadamente. Se debe dejar que cure por completo esta capa, para lo cual deberá transcurrir por lo menos 24 horas. Asegurando este extremo se procederá a terminar la operación rellenando el resto de las juntas, llagueando bien las uniones verticales y horizontales.

La protección posterior del paramento puede hacerse con una capa de recubrimiento a base de resinas sintéticas del tipo flexible, por ejemplo, de tipo acrílico. Hay que vigilar la clase de revestimiento que se aplique, para asegurar la evaporación del agua de condensación que absorba la obra. Una pintura que constituya una verdadera barrera de vapor, por ejemplo, no permite su evacuación. Y en consecuencia, el agua acumulada provocará humedades y diversas lesiones, descomponiendo el material de la propia obra, además de destruir el recubrimiento aplicado. Por lo tanto, este tipo de preparados debe aplicarse después de haberse asegurado, previo informe técnico de que son adecuados para la misión asignada y que no aumentarán las probabilidades de aparición de lesiones, en lugar de evitarlas.

Además de los fallos ejecución y aquellos imputables a los materiales defectuosos, las más importantes que afectan a las obras de ladrillería son los ataques de los sulfatos a los morteros y a sus revestimientos de mortero; la retracción del fraguado; y la cristalización de las sales contenidas en la masa de las piezas cerámicas con la aparición de eflorescencias.

#### **VII.17.3.1. Ataque de los sulfatos a los morteros**

La disgregación suele comenzar con la dilatación del mortero, lo que da ocasión a que aparezcan deformaciones y grietas en los paramentos del muro; en caso grave es posible que se presenten rupturas en los cantos de los ladrillos. El origen de este fenómeno se debe a una reacción de los sulfatos que contienen los ladrillos al combinarse con los aluminatos del mortero de cemento portland. La reacción se produce en presencia de agua, es decir, se trata de un defecto propio de las obras de fábrica que, por una u otra razón, están expuestas a la acción continua del agua y carecen de protección impermeable. Se trata de un caso bastante frecuente en los muros de cerramiento de ladrillo visto en los edificios urbanos, que degeneran con facilidad para convertirse en paramentos enfermos.

El tratamiento dependerá del estado de las lesiones.

En el supuesto de que la enfermedad se halle en fase avanzada y sea muy evidente la descomposición de los materiales, la solución más lógica (y en cierta medida también la más económica) será destruir la parte dañada y volver a construir de nuevo.

En los casos de lesiones leves o de tipo mediano se recurre a la eliminación de las partes atacadas, procediendo al rejuntado de las piezas con el resto de la obra. Debe procurarse de que no quede material enfermo, por la facilidad que tiene esta clase de lesiones de extenderse y pasar a dañar las zonas en contacto, y de allí al resto de la obra.

Cuando el muro lleva un recubrimiento de acabado, el mal se detecta por la aparición de agrietamientos, provocado por la acción agresiva de los mencionados sulfatos. Hay que comenzar por eliminar el aplanado y limpiar con eficiencia la



superficie recubierta de los ladrillos. Para realizar tal operación de saneamiento se utilizan cepillos de alambre, actuando en seco e insistiendo una y otra vez sobre las juntas, en donde suelen estar las partes dañadas. Una vez terminada la limpieza se procede al rejuntado de los ladrillos y se tiene un nuevo recubrimiento de acabado.

#### VII.17.4. REPARACIÓN DE UN DESCONCHADO

Si es posible, ante todo habrá que eliminar las causas que han provocado la desintegración, lo cual puede significar que se pique todo el revestimiento lesionado por sus bordes, sanear el soporte y tender un nuevo revestimiento de características adecuadas a la situación creada.

En el supuesto de que la superficie dañada sea pequeña, puede hablarse entonces de recurrir a un remedio. La forma de actuar es en todo caso, siempre la misma. Se comienza por limpiar la zona afectada con un cepillo de cerdas plásticas o púas metálicas, según sea el estado de la lesión. Hay que insistir en su perímetro, para eliminar las partes débiles que ofrezcan pocas garantías de resistencia. Humedecer ligeramente el soporte y aplicar a continuación un mortero nuevo bien dosificado y más poroso que el soporte, procurando compactar con insistencia las zonas de unión en que el nuevo revestimiento enlazará con el revestimiento ya seco de las paredes.

Destaquemos que, en estos casos, hay que poner especial cuidado en la dosificación de la mezcla aglomerante que se aplique para tapan el desconchado. Para que un revoque agarre perfectamente sobre el soporte, los estratos que forma dicha capa deben ofrecer una porosidad decreciente, a partir del propio soporte hacia la periferia. Es decir, si una de las causas más frecuentes de la aparición de desconchados se halla en el hecho de aplicar indebidamente una capa muy rica de cemento encima de un soporte poroso, hay que poner especial atención para evitar que se caiga en el mismo defecto al proceder a remendar un paramento que se haya lesionado precisamente por dicha causa.

Hay quien piensa, equivocadamente, que si un soporte debido a su constitución, ofrece escasa resistencia, tal defecto puede compensarse aplicando un mortero fuerte y compacto, pensando que con el mismo se refuerza y protege mejor la mencionada superficie. Pero lo que sucede, en realidad, es que un aglomerante rico tiene tendencia a sufrir fuertes efectos de contracción y dilatación, distintas de las que experimenta el soporte al mismo tiempo, lo que origina la pérdida de cohesión estructural del revestimiento y la destrucción paulatina de su poder de adherencia.

#### VII.17.5. PROTECCIÓN DE UN REVESTIMIENTO POR MEDIO DE MALLADO

Para evitar los agrietamientos en los revestimientos de un paramento, uno de los recursos más conocidos y eficaces consiste en interponer, entre el soporte y la capa del mortero, una fina malla de material imputrescible e inoxidable, capaz de resistir sin alterar la alcalinidad del cemento, para formar una armadura ligera que dará mayor cohesión a la masa y amortiguará los efectos de la retracción, hasta el punto de que evitará al secar, la fisuración, el cuarteamiento y el agrietamiento de la masa.

Básicamente, estas mallas consisten en un reticulado de material resistente e indeformable, que confieren al mortero unas cualidades de durabilidad e indeformabilidad muy elevadas. En la actualidad este material suele ser la fibra de vidrio en forma de hilos o cintas muy estrechas, entrecruzadas y soldadas entre sí.

El mercado suministra varios tipos de mallas para el armado de revestimientos, así como tejidos también de fibra de vidrio y de hilos de poliéster. Estos últimos, además de su misión de crear armadura para el mortero, sirven para reforzar los sistemas de aislamiento y estanqueidad de los paramentos exteriores.

Casi todos los productos recomiendan, en las instrucciones para su colocación, que se extienda previamente una ligera capa del aglomerante sobre la superficie del soporte, para aplicar en seguida la malla, la cual quedará adherida perfectamente debido a su configuración y a su escaso peso. A continuación se procederá al tendido normal de la capa de revestimiento.

### **VII.17.6. ACABADOS DE PINTURA**

El revestimiento de mortero, por sí mismo, puede considerarse como un material de acabado que no precisa de ningún aditamento posterior de carácter decorativo. Igualmente puede decirse de la obra de fábrica vista y de la realizada con concreto reforzado. Sin embargo, en ocasiones resulta aconsejable proteger la superficie de un paramento exterior con un producto capaz de conferirle ciertas cualidades de las que carece, o de reforzarlas, en el caso de que ya las posea. Esta misión se encomienda a las pinturas y barnices especiales formulados expresamente para la protección.

La principal propiedad que se solita a estos productos de acabado es la de proteger el soporte contra la acción del agua de lluvia. Paralelamente deberá evitar la presencia de humedades y defender la superficie tratada de la contaminación atmosférica, así como de los agentes biológicos-químicos que lleva incorporados el aire. Es decir, a los productos que se utilizan para la protección de paramentos, se les debe exigir que:

- Limiten al máximo la penetración del agua en el paramento y que al mismo tiempo sean capaces de controlar la difusión del vapor.
- Absorban las condensaciones superficiales de corta duración.
- Mejoren los comportamientos físico-químicos de los materiales protegidos.
- Refuercen la capa superficial y la hagan más dura y resistente.
- Se adhieran fácilmente al soporte y queden perfectamente fijados a él.
- No se deterioren con el paso del tiempo ni por las acciones agresivas procedentes del exterior, ni procedentes de la propia naturaleza del soporte.
- La capa de acabado se lavable e inodora.

Un barniz es un material de recubrimiento formado por la mezcla homogénea de un aceite secante, una resina natural o sintética y un disolvente. Esta mezcla, que carece de pigmentos colorantes, puede definirse como un producto de consistencia líquida, transparente e incoloro. Tiene el carácter de material protector de acabado, que al secar forma una película brillante, aterciopelada o mate según los componentes de la fórmula utilizada. Pero en cualquier caso, deja ver el fondo, al que ni tapa ni modifica visualmente, es decir, que una vez aplicado el barniz y seca la capa no se altera la parte barnizada sino por un pequeño aumento en el matiz original.



Las pinturas en cambio, incorporan a la mezcla pigmentos colorantes y cargas, lo que permite contar con un preparado fluido que ofrece una extensa gama de colores y que, además, es opaco. El producto se utiliza, al igual que los barnices, para proteger las superficies, pero su característica particular de ofrecer un acabado coloreado y opaco, hace que se le confieran unas cualidades eminentemente decorativas.

En principio, debe considerarse que la misión primordial de una pintura o un barniz será formar una película inalterable, homogénea repartida por el soporte, al que deberá proteger. Al terminar el proceso del secado, más o menos lento según los casos, la película formada deberá asegurar las condiciones conseguidas durante un cierto tiempo.

### VII.17.7. TRATAMIENTO DE LOS DEFECTOS EN LOS ACABADOS DE PINTURA

Presentado el defecto, procede su eliminación, lo cual no resulta demasiado difícil siempre que los fallos sean accesibles y no obliguen a montar un complejo de andamios. En todo caso, además de atacar directamente las consecuencias del defecto, no tanto por motivos estéticos como por restablecer la condición de elemento protector que corresponde a un acabado de pintura, hay que intentar la localización de las causas originales para anular y evitar que se repitan las lesiones.

En este supuesto, cuando aquellas afecten a una gran parte del paramento lo más aconsejable será sanear la parte dañada y proceder a continuación como si se tratase de una obra nueva. Con la ventaja de que por conocer el riesgo de que se presenten determinados defectos que tiene aquel paramento concreto, no considerado genéricamente sino por sus propias características y reacciones particulares, será más fácil prevenir adecuadamente la posibilidad de que se repitan.

Para evitar que las lesiones se propaguen al soporte, es aconsejable corregir el defecto lo antes posible, saneando la parte afectada y volviendo a pintar. De no hacerse así, se corre el peligro de que se produzcan erosiones en el aplanado, que irán degenerando y arruinando el material. En esta reparación deberá evitarse especialmente, caer en los mismos vicios que causaron los males.

#### VII.17.7.1. Preparación de la superficie a pintar

Observando con atención el estado de la capa de pintura de la zona tratada, pueden ocurrir tres casos:

- Que la película antigua se halle en tan mal estado que deba procederse a su eliminación total,
- Que, contrariamente, la pintura antigua esté todavía en buen estado de conservación y pueda utilizarse como soporte para recibir las nuevas capas, o bien
- Que el estado de la pintura antigua esté parcialmente deteriorado y pueda aprovecharse las zonas sanas como soporte, limitando la reparación a las zonas enfermas, decapando aquellas partes que presentan ampollas, cuarteamientos, agrietamientos, etc.

Previamente se habrán solventado los desperfectos ocasionados por la eliminación de los defectos que presentaba la pintura, rellenando los huecos producidos en el aplanado y alisando la superficie ya reparada. Se aconseja trabajar con morteros que tengan la misma o parecida estructura superficial que el anterior material usado en la obra.

Para pintar encima de la película vieja, hay que asegurarse de su buen estado de conservación y de que admitirá las nuevas capas de pintura sin alterarse. Pero a la más mínima duda, será preferible quitar la pintura antigua. En el supuesto de que sea aprovechada total o parcialmente aquélla, la primera fase del proceso consistirá en lavar el soporte.

#### **VII.17.7.2. Lavado**

La operación debe realizarse con una esponja humedecida en agua, a la que se habrá agregado una pequeña cantidad de detergente. Las manchas se eliminarán insistiendo en aquellos puntos en donde sea necesario, aumentando la presión y, si es preciso, la concentración del detergente, aclarando después con abundante agua limpia.

Estas manchas deben desaparecer tanto para que la pintura nueva encuentre una superficie de agarre perfectamente desengrasada, como para evitar que vuelvan a salir a la superficie al cabo de cierto tiempo, al actuar químicamente sobre la película de la pintura superpuesta.

El lavado a mano es una solución para paramentos de poca altura, tales como fachadas de casas unifamiliares, pequeñas construcciones, etc. Para los grandes edificios, que requieran el uso de andamios es preferible recurrir al lavado mecánico por medio de chorros de agua a alta presión.

#### **VII.17.7.3. Decapado**

Decapar una superficie consiste en preparar la misma para facilitar el desprendimiento de la capa de pintura con la que fue recubierta, como operación previa para proceder a su restauración. Aunque lo aconsejable será quitar siempre las pinturas viejas para no pintar sobre ellas, la práctica autoriza el aprovechamiento del soporte pintado, siempre que la película no esté deteriorada y permanezca sólidamente adherida al soporte.

El decapado consiste esencialmente, en reblandecer la pintura ya seca de su soporte, dejándola en condiciones de que puede ser rascada y eliminada totalmente y con cierta facilidad. El reblandecimiento puede conseguirse por varias vías: las tradicionalmente empleadas pasan por la utilización de un decapante o de la candileja. Los decapantes son productos que sirven para ablandar las pinturas viejas, por cuyo motivo se les denomina, «quitapinturas». Existe una amplia gama de marcas y características, ya que se fabrican decapantes distintos para diferentes tipos de pinturas, a base de lejías (decapantes alcalinos), ácido fénico (decapantes ácidos) y hidrocarburos aromáticos (decapantes neutros). Estos últimos son los que tienen mayor potencia.

Por su parte, la candileja es un aparato de mano que proyecta una llama en forma de dardo de elevado poder calorífico, alimentada por un cartucho de butano, y que antiguamente funcionaba a base de gasolina. Con este instrumento se flamea la superficie pintada y se consigue su reblandecimiento, desprendiéndose



el soporte de la película quemada al insistir. Hoy en día, la candileja suele sustituirse por los llamados decapadores de pistola, que recuerdan por su diseño a los domésticos secadores de cabello y que, como ellos, proyectan un chorro de aire caliente, pero a más alta temperatura. Estos aparatos funcionan conectados a la red eléctrica, o bien por medio de una batería alojada en el mismo mango de la herramienta.

La operación siguiente una vez ablandada la película de pintura, consiste en arrancarla del soporte. Esta fase del proceso se denomina «rascado».

El rascado se realiza por medio de una herramienta de hoja ancha como la espátula o una herramienta similar, capaz de deslizarse por la superficie sin dañar el paramento, para desprender la película y eliminarla.

#### VII.17.7.4. Enmasillado

Una vez que se ha eliminado totalmente la capa de pintura vieja, conviene limpiar la superficie rascada para que desaparezca el polvillo que pudiera quedar adherido al paramento, así como cualquier resto de suciedad que hubiese resistido al anterior tratamiento.

Llegamos así al llamado «enmasillado». Corresponde a la fase que se dedica a rellenar las hendiduras que presenta el soporte, como por ejemplo, arañazos, agujeros, rascaduras, finuras, agrietamientos, pequeñas desigualdades de nivel, etc., que presenta el paramento. En una palabra, se trata de lograr un soporte que presente la superficie lisa, plana o lo más homogénea que sea posible, apta para recibir en las mejores condiciones las manos de pintura que constituirán su recubrimiento de acabado.

El enmasillado se realiza por medio de una masilla en pasta, producto de consistencia cremosa que se aplica en estado espeso con una espátula, para tapar los defectos en bajo relieve que ofrece el paramento. Las masillas por lo general son expeditas en forma de polvos, que deben mezclarse en agua para lograr una masa homogénea, cuya base suele ser un aglomerante graso, oleorresinoso o de cola, cuya principal misión es la evitar que se produzcan retracciones después del fraguado. Es aconsejable utilizar productos que una vez amasados y secos ofrezcan la misma o parecida estructura superficial que el material usado en la obra.

Termina esta fase y totalmente secas las partes enmasilladas, se aconseja lijar la superficie tratada para eliminar las últimas imperfecciones. Sólo entonces estará el soporte en condiciones de recibir la imprimación.

#### VII.17.7.5. Imprimación

Recibe este nombre, la operación de someter la superficie que debe ser pintada a una preparación impermeable. Esta misión se encomienda a un producto especial, lo suficientemente fluido como para penetrar en los poros lo más profundamente posible, con objeto de taponarlo al secar, formando una película continua, sólida e impermeable, protectora de todo el soporte contra la acción de las humedades.

Al elegir el tipo de imprimador hay que tener en cuenta que la perfecta adherencia posterior de la película de acabado y sobre todo, su estabilidad, depende de la compatibilidad del grado de acidez pH entre el soporte y su recubrimiento. Por lo tanto, el producto que se utiliza para la imprimación estará calculado de acuerdo con las características particulares de los materiales de soporte (yeso, mortero, cemento, ladrillo, etc.) y las que tiene la pintura de recubrimiento final.

La capa impermeabilizadora de un soporte puede darse con una gran variedad de preparados que ofrece el mercado, la mayoría de los cuales se aplica a la brocha. En los momentos actuales se advierte la tendencia a emplear, como producto de imprimación o bien compuestos de dispersión resinosa sintética, o bien un pintura hidrófuga al silicato. Esta última, aunque de precio elevado, posee unas propiedades que aseguran unos resultados inmejorables. Son preparados muy adsorbentes y porosos al mismo tiempo, que permiten una impregnación en profundidad y cuya acción se complementa con una solución de resinas de siliconas como capa de acabado, la cual incrementa notablemente la impermeabilidad de una fachada.

#### VII.17.7.6. Sellados

Los productos empleados para una impregnación impermeabilizadora a base de un barniz transparente se denominan «compuestos de sellado». Sellar equivale a fijar. En realidad y por extensión del vocablo, todos los preparados imprimadores pueden considerarse como fijadores del soporte, esto es, selladores. Los selladores transparentes tienen la ventaja de que no alteran el color ni la textura de los materiales del soporte, y esta característica es muy importante cuando el sellado actúa tanto como capa de imprimación como de acabado.

En el supuesto de que la función de la capa imprimadora sea la de servir como base a la capa de pintura de acabado, debe tenerse en cuenta un importante factor económico: un preparado para imprimación es más económico que una buena pintura, tanto si se compra ya preparada en fábrica, como si es compuesta por el propio pintor. Encima de una capa selladora, la pincelada se desliza con mayor naturalidad y la pintura de acabado se extiende con un mejor rendimiento, consumiendo menos material por la poca adsorción que ofrece el soporte. Pero además, y ello es quizás lo más importante, la imprimación asegura una larga duración de la pintura del recubrimiento final, haciendo más resistente dicha capa, cuya vida alarga al doble o triple de lo normal. Una capa de pintura de la mejor calidad aplicada directamente sobre un soporte sin preparar, puede arruinarse antes de transcurrir cinco años. Y muchas veces, ante condiciones ambientales desfavorables, tarda incluso menos en degradarse. El mismo producto extendido sobre una película de imprimación puede alargar su vida otros 12 o 15 años, que en casos afortunados puede acercarse al cuarto de siglo y aún superarlo.

#### VII.17.8. CONSOLIDACIÓN

Tratándose de piedras porosas y escasamente resistentes, será aconsejable endurecer la superficie del material para asegurar una larga vida a su textura. Los productos consolidantes tienen como misión endurecer los paramentos de la construcción, confiriendo a las piedras fácilmente erosionables unas cualidades de extraordinaria resistencia. La operación de impregnar los paramentos con un producto consolidante se conoce con el nombre de «silicatación».

### VII.17.9. PROCESO DE CONSERVACIÓN A BASE DE PINTURAS

El tratamiento protector de una construcción es la operación que se aconseja realizar una vez finalizado su proceso completo de lavado. Tiene por objeto dificultar, en las superficies verticales, la aceptación de suciedades y su acumulación, actuando especialmente como una barrera impermeable contra la formación de humedades. Es decir, se trata de consolidar la superficie ya lavada, impregnándola de una nueva sustancia hidrófuga que repela el agua.

La protección se realiza a base de productos formulados expresamente para cubrir tal misión. Entre ellos deben distinguirse dos tipos de preparados:

- Transparentes, cuyo poder cubriente es invisible, y
- Opacos, que tapan y ocultan la superficie tratada, y que pueden incorporar pigmentos cromáticos, por lo que sirven a un mismo tiempo de manto protector y de revestimiento decorativo.

#### VII.17.9.1. Pinturas hidrofugantes

El concreto tiene naturaleza hidrófila, o sea, tiene afinidad con el agua y el vapor de agua. Consecuentemente adsorbe agua en forma líquida o vapor a través de varios mecanismos: gradiente de presión, difusión, higroscopia, condensación y principalmente absorción capilar. Esta absorción capilar se da en las fachadas, debido a la formación de una película de agua de lluvia, y en las regiones donde el agua entra en contacto directo en la estructura, como por ejemplo en las cimentaciones y dalas de cimentación. Es muy intensa la absorción capilar, siendo determinada básicamente por el diámetro de los poros y capilares.

Ciertos productos tienen la propiedad de alterar el ángulo de contacto entre la pared del capilar y la superficie del agua. Cuando este ángulo supera  $90^\circ$ , estos productos son llamados hidrófugos, hidrorepelentes o hidrofugantes (véase figura VII.24).

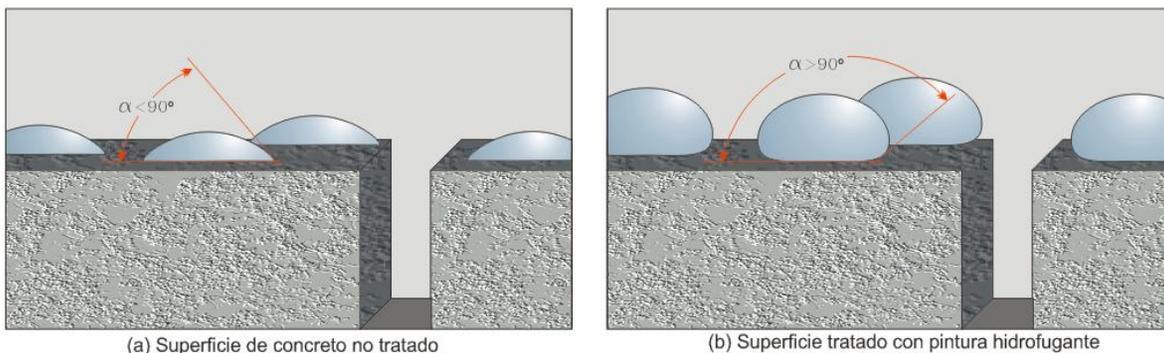


Figura VII.24. Variación del ángulo de contacto líquido-superficie debido a la impregnación de pintura hidrofugante.

Estos productos tornan por lo tanto las superficies de concreto repelentes al agua, sin impedir el paso de gases y vapor de agua. Conceptualmente no son considerados como pinturas, sino agentes de impregnación.

Las principales características que deben reunir estos productos son:

- Reduce la capacidad de absorción de agua de las superficies de concreto.

- Reduce la permeabilidad a sales solubles.
- Permite el paso del vapor de agua existente en los poros capilares para el medio ambiente (secado del concreto húmedo).
- Posee elevada capacidad de penetración en los poros capilares del concreto.
- Como no son formadores de películas, no alteran el aspecto estético de la superficie.
- Poseen elevada resistencia a la fotodescomposición por la acción de rayos ultravioleta.
- No requieren superficie lisa y continua para la aplicación, lo que los habilita al uso de superficies rugosas expuestas de concreto.

Las limitaciones de estos productos son los siguientes:

- No impiden la carbonatación del concreto, a pesar de reducirla.
- No impiden la penetración de agua, gases o vapores a presión.
- No impiden la lixiviación del concreto, a pesar de reducirla.

Las principales sustancias utilizadas son constituidas por compuestos sílico-orgánicos, tales como silicones dispersos en solventes o emulsionados en agua y silanos dispersos en solventes.

La tabla VII.4 contiene la denominación de los productos y su naturaleza.

<b>denominación</b>	<b>naturaleza del producto</b>
emulsión base agua (siliconatos)	emulsión de silicatos emulsión de silicatos de potasio
emulsión base solvente (resina de silicona)	emulsión de silicatos emulsión de silicatos orgánicos
emulsión base solvente	emulsión de silicatos
emulsión oligomérica base solvente	emulsión de silicatos oligoméricos emulsión de silicatos orgánicos
emulsión polimérica base solvente	emulsión de silicatos poliméricos emulsión de silicatos orgánicos

**Tabla VII.4.** Pinturas hidrofugantes.

#### **VII.17.9.2. Pinturas impermeabilizantes**

El mecanismo básico de protección por pinturas impermeabilizantes de superficies consiste en la formación de una película semiflexible y continua, que actúa como barrera ante gases, agua y vapor de agua.

Estas pinturas requieren sustratos homogéneos y lisos, con poros de abertura máxima de 0.1 mm.

La mayoría no es capaz de absorber eventuales fisuras posteriores de la estructura, o sea, son capaces de cubrir una fisura existente de hasta 0.1 mm, pero la película se rompe si la estructura se fisura después que la pintura de protección está concluida.



Las principales características que deben reunir estas pinturas son:

- Reduce significativamente la carbonatación.
- Reduce significativamente la lixiviación.
- Reduce la permeabilidad y difusión de sales solubles.
- Reduce la aparición de moho e inhiben el crecimiento de hongos y bacterias.

Las limitaciones de estas pinturas son los siguientes:

- No permiten el secado del concreto húmedo.
- No permiten los barnices incoloros y opacos, alterar el aspecto original del concreto confiriéndole brillo a la superficie.
- Requieren superficies uniformes y homogéneas, no son tan adecuados para superficies de concreto obtenidas con cimbras rugosas, debido a esta circunstancia si el sustrato no se encuentra liso y homogéneo, será necesario un tratamiento previo para adecuarlo a la pintura.

La tabla VII.5 describe la naturaleza de los productos más comúnmente usados como pintura de protección, así como su aplicación.

Naturaleza y características del sistema de resina utilizado	Modo de curado	Disolución de la pintura	Espesor típico de la película seca (mm)	Ámbitos de aplicación convencionales
Epóxica bicomponente	acción con componente endurecedor	en solvente	0.020 a 0.250	pisos industriales, superficies internas y tanques de agua potable
Epóxica bicomponente	acción con componente endurecedor	en resina de solvente	Mayor de 1.5	tanques para confinamiento de productos químicos, tuberías y superficies internas sujetas a alto ataque químico
Epóxica bicomponente	acción con componente endurecedor	dispersión en agua	0.040 a 0.120	pinturas de áreas internas en industrias alimenticias, sellado de pisos industriales y superficies internas
Urethane alifático bicomponente	acción con componente endurecedor	en solvente	0.025 a 0.075	pintura anticarbonatación y pinturas internas o externas de alta resistencia química
Urethane alifático bicomponente	acción con la humedad atmosférica	en resina de solvente	0.500 a 2.000	pintura de alta resistencia a la abrasión para pisos industriales
Urethane alifático bicomponente	simple evaporación del solvente	en solvente	0.125 a 0.150	pinturas de pisos industriales, terminación antiresbalante y pintura de áreas internas y externas
Epóxica	simple evaporación del solvente	en solvente	0.025 a 0.070	pintura de alta resistencia química, pero con baja resistencia a solventes
Resina clorada	simple evaporación del solvente	en solvente	0.100 a 0.300	pinturas anticarbonatación, buena resistencia a la abrasión, humedad y álcalis, pintura de pisos industriales, franjas demarcatorias y piscinas
Epóxico	simple evaporación del solvente	en solvente	0.020 a 0.250	pintura anticarbonatación, pintura de superficies internas y externas, con razonable estabilidad de color y de resistencia a la fotodegradación
Epóxico	simple evaporación del agua	dispersión en agua	0.040 a 0.700	pinturas anticarbonatación para superficies internas y externas, buena estabilidad de color y resistencia a la fotodegradación

Naturaleza y características del sistema de resina utilizado	Modo de curado	Dosificación de la pintura	Espesor típico de la película seca (mm)	Ejemplos de aplicación convencionales
Estireno-acrílico	Simple evaporación del solvente	se solvente	0.020 a 0.200	Pintura anticarbonatación, poca resistencia al interperismo y a la fotodegradación
Sistema duplo epóxica-poliuretano	acción con los componentes endurecedores	se solvente	0.100 a 0.250	Pinturas de buen comportamiento frente a la carbonatación y pinturas externas o internas de alta resistencia química

**Tabla VII.5.** Pinturas de protección.

Es conveniente destacar que las características del concreto sobre todo en las capas próximas a la superficie, tienen influencia significativa en el comportamiento y adherencia del sistema de pintura, así como, la calidad de la pintura o barniz.

Los defectos más comunes en las pinturas de acabado son:

- Ampollas sobre la película de pintura. Para evitar la aparición de ampollas, antes de dar la primera mano de pintura hay que asegurarse de que se va a operar sobre un soporte carente de humedad.
- Cuarteamiento en las pinturas. La forma correcta de proceder para evitar tal fallo consiste en utilizar siempre pintura de idéntica naturaleza para ambas manos, cuidando especialmente de no aplicar la capa de acabado mientras no esté perfectamente seca la que sirve de apoyo.

## VII.18. PREVENCIÓN

El mejor sistema para prevenir y retrasar el deterioro es el conocimiento y utilización correcta de los materiales de construcción, junto con una supervisión adecuada.

Desafortunadamente en muchas partes del país no se tiene un conocimiento adecuado de los materiales de construcción y ello conlleva a su utilización inadecuada. Por ejemplo, en climas marinos se continúa utilizando el cemento portland ordinario. Aún cuando se prepare el concreto con una nueva dosificación, se tendrán problemas de durabilidad a corto plazo.

Además del uso de materiales de construcción en sitios inadecuados, como el caso anterior, se tiene también el uso inadecuado de éstos que incluyen la utilización de agregados salitrosos, agregados con granulometría inadecuada o revestimientos inadecuados al acero de refuerzo. Estos factores conllevan a una degradación prematura del concreto reforzado.

El aspecto de la supervisión es igualmente importante para la durabilidad de una estructura, pues de nada sirve la selección y utilización adecuada de los materiales de construcción si no se evita, durante la construcción, la aparición de vicios como el uso de arena de mar, recubrimientos inadecuados y acero pre-corroído, por mencionar algunos.

Por tal motivo, para prevenir defectos en las estructuras de concreto, lo que debemos buscar es obtener una durabilidad, la cual es frecuentemente más difícil de obtener que las propiedades mecánicas necesarias. La durabilidad no sólo requiere de la resistencia relativa a la abrasión y al fisuramiento, sino que también requiere que la pasta de cemento endurecida tenga una resistencia a la penetración de gases, líquidos y sólidos disueltos.



Los líquidos y gases más comunes que agreden a una estructura de concreto son el agua, los iones puros o agresivos, el dióxido de carbono y el oxígeno. La durabilidad del concreto depende en gran medida de la facilidad con que éstos entran y se mueven a través del concreto. La permeabilidad al aire es también importante porque favorece el fenómeno de carbonatación, con sus consiguientes efectos perjudiciales sobre la corrosión del acero de refuerzo.

Considerando la importante injerencia que se atribuye a la permeabilidad del concreto a la durabilidad de las estructuras, resulta preciso identificar los principales factores que influyen en dicha permeabilidad, para tomarlos en cuenta en la selección de los componentes, en el diseño de las mezclas de concreto y en las construcción de los elementos constructivo, no sólo con el fin de darles la impermeabilidad necesaria sino también hacerlas más durables. Construir estructuras de concreto que, además de resistentes, requiere de manera ineludible desarrollar especificaciones con ese fin.

La cualidad de ser durable es un concepto menos preciso que el de las propiedades mecánicas del concreto endurecido, pues no sólo depende de factores intrínsecos del material sino también extrínsecos relacionadas con las condiciones de exposición y servicio de las estructuras. Por tal motivo, cuando se requiere que una estructura de concreto se diseñe con la finalidad de proporcionarle mayor durabilidad, resulta necesario ser más específico, definiendo y evaluando las condiciones adversas que pueden poner en riesgo dicha durabilidad.

Es pertinente señalar que los criterios aplicables en el diseño para satisfacer los requerimientos especificados en el concreto endurecido, no son excluyentes sino complementario. Lo cual significa que la obtención de las propiedades mecánicas requeridas deben considerarse como una más de las condiciones que son esenciales para que la estructuras de concreto resulten duraderas.

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

## VII.19. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO

La propuesta de mantenimiento deberá comprender todas aquellas acciones destinadas a mantener la integridad de la unidad reparada, así como de los materiales y elementos que hayamos aportado para su reparación.

Al ahora de redactar el plan de mantenimiento de una estructura, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- **Ámbito del programa.** Se incluirán las especificaciones descriptivas de las acciones incluidas en el programa, y la duración de las mismas. Dichas acciones se considerarán básicamente correctivas.
- **Objetivo de la intervención.** Se refiere al estado de la estructura en la cual se va a desarrollar el programa, a describir, mediante el reconocimiento correspondiente y la referencia a la *Documentación técnica* disponible.
- **Descripción de las acciones.** Comprende la realización de actuaciones a realizar, con la periodicidad correspondiente, y en su caso, análisis de la vida útil de los diversos elementos e instalaciones de ciclo de durabilidad inferior a la vida útil del edificio.
- **Análisis económico.** Abarca la cuantificación inicial, referida a períodos concretos (anuales preferentemente) de aplicación del programa, desglosando sus diversos conceptos, y previendo la posible revisión de precios a partir del período inicial.

Los servicios de mantenimiento de las estructuras de concreto pueden estar incluidas en un programa de mantenimiento preventivo o en un programa de mantenimiento correctivo.

Un programa de mantenimiento preventivo intervendrá en las fachadas y superficies de concreto expuestas antes de que estas presenten señales significativas de degradación. En el caso de mantenimiento correctivo (lamentablemente la situación más común), los trabajos no se deberán ejecutar sin antes realizar un diagnóstico previo del problema para la identificación de las causas, y entonces proceder a la protección del concreto.

Estas acciones de mantenimiento estarán encaminadas a verificar la comprobación de su estado, y la protección y refuerzo.

De esta manera podemos analizar en función de su elemento constructivo y del material, las acciones a llevar a cabo y su periodicidad.

- **Cimentaciones.** En el caso de las cimentaciones, debemos asegurarnos de su integridad mecánica (roturas) frente a posibles agresiones de los componentes del suelo, así como su integridad química frente a posibles agresiones de los componentes del suelo, en especial, el nivel freático, la aparición de sulfatos, ruptura de conductos de saneamiento, etc. La acción fundamental será pues, la observación periódica.
- **Muros de contención.** Los procesos patológicos a vigilar son parecidos a los anteriores y sólo cabe añadir, en relación a su integridad mecánica, la posible deformación de los muros con la aparición de alabeos y desplomes. Se debe realizar una observación periódica de, al menos: protección superior (albardillas), protección superficial general, si existe (aplanados, pinturas, etc.), y armaduras superficiales en las de concreto reforzado.
- **Columnas y vigas.** Habrá que comprobar su integridad mecánica con observación periódica de posibles deformaciones y rupturas (grietas y fisuras). En cuanto a su integridad físico-química, conviene a considerar el tipo de material, para el concreto reforzado, comprobar el estado de las protecciones existentes y la necesidad de su reposición así como las posibles afecciones meteorológicas, mecánicas y químicas de contaminantes.
- **Cubiertas y losas.** En general, comprobación periódica de su integridad mecánica, con observación de posibles deformaciones (flechas) y rupturas (grietas y fisuras) sobre todo en vano central y zonas de apoyo.
- **Fachadas.** En general, vigilar periódicamente la aparición de lesiones como deformaciones (desplomes, alabeos, pandeos y hundimientos), rupturas (grietas y fisuras), erosiones, estado del material de protección, si existe, en muros, ventanas, vanos de puertas y acristalamiento.

## VII.20. MATERIALES Y SISTEMA DE REPARACIÓN, REFUERZO Y PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Material	Características principales	Aplicación
Concreto	Elevado módulo de elasticidad, baja adherencia, resistencia y durabilidad variables.	Grandes volúmenes.
Concreto lanzado	Homogeneidad de la mezcla, baja flexión, buena adherencia y elevada resistencia.	Vía seca y vía húmeda.
Microconcreto	Fluido, auto-compactable, contracción compensada, buena adherencia, elevada resistencia inicial y final y baja permeabilidad.	Reparaciones y refuerzo en elementos estructurales con espesores de 10 a 300 mm.
Aditivo acelerador de inicio de fraguado.	Libre de cloruros, y reducida flexión.	Concreto lanzado vía seca o humedad.



Material	Características principales	Aplicación
Aditivo acelerador de endurecimiento.	Aumento en la resistencia inicial.	Necesidad de descimbrado rápido y puesta rápida en servicio.
Aditivo retardador.	Permite mayor tiempo de manipulación de morteros y concretos.	Ideal para reparaciones trabajosas y demoradas.
Aditivo plastificante.	Aumenta la fluidez y reduce la relación agua/cemento para una misma consistencia.	Morteros y concretos en general.
Aditivo superplastificante	Aumento acentuado de fluidez y reducción de la relación agua-cemento.	Concreto fluido para colado en locales con alta densidad de acero de refuerzo y colados difíciles o especiales.
Aditivo expansor.	Puede anular los efectos dañinos de la contracción.	Llenado de cavidades donde no se permite contracción.
Aditivo impermeabilizante.	Reduce la absorción de agua por capilaridad, fácil terminación superficial, contracción compensada, tixotrópico, buena adherencia, elevada resistencia y baja permeabilidad.	Morteros de revestimiento impermeabilizantes, revestimientos y acabados superficiales con espesor de 0.5 a 3 mm.
Mortero polimérico de base cemento.	Baja contracción, tixotrópico, buena adherencia, elevada resistencia y baja permeabilidad.	Reparaciones superficiales y revestimientos de elementos estructurales con espesor de 5 a 50 mm.
Morteros de base cemento	Contracción compensada, tixotrópico, autocompactable buena adherencia, elevada resistencia, y baja permeabilidad.	Reparaciones y refuerzos estructurales, con un espesor de 10 a 60 mm.
Lechada de base de cemento.	Bombeable, contracción compensada, fluido, elevada resistencia inicial y final, y autocompactable.	Reparación y refuerzos inmersos con espesores de 20 a 60 mm. Anclaje de equipos y llenado de grandes cavidades con espesores de hasta 30 mm.
Morteros de base epóxica.	Tixotrópico, elevada resistencia a compresión, a la abrasión, a la acción de productos químicos, y elevada adherencia al concreto.	Reparaciones de elementos estructurales, pisos, tanques, donde haya necesidad de liberación rápida (24 horas) o de elevada resistencia química.
Morteros de base poliéster.	Elevada resistencia inicial, baja contracción, elevada resistencia a productos químicos.	Reparación de elementos estructurales, pisos, tanques, reconstrucción de juntas de cerámica antiácida donde haya necesidad de liberación rápida (24 horas) o elevada resistencia química en espesor de 2 a 15 mm y área menor de 0.25 m <sup>2</sup> .
Morteros de base furánica.	Resistencias a temperaturas de trabajo de hasta 200°C, baja contracción, elevada resistencia a los productos químicos.	Reconstrucción de juntas de cerámica y losetas antiácidas de espesores de hasta 15 mm.
Morteros de base estervinílica.	Resistente a temperaturas de trabajo de hasta 115°C, baja contracción, elevada resistencia a los productos químicos.	Reconstrucción de juntas de cerámica y losetas antiácidas en espesores de hasta 15 mm.
Lechada de base epóxica.	Autocompactable, elevada fluidez, excelente adherencia, baja viscosidad y elevadas resistencias mecánicas y químicas.	Reparación y refuerzo de elementos estructurales o empotrado de equipos sujetos a elevadas vibraciones con espesores de 10 a 70 mm.
Silicatación	Aumento de la dureza y disminución de la porosidad superficial del concreto.	Pisos y superficies de concreto arquitectónico.
Hidrofugante.	Elevada penetración en el sustrato, reduce la absorción de agua y penetración de cloruros.	Concreto arquitectónico en interiores y exteriores.
Barniz.	Elevada adherencia al sustrato, reduce la penetración de CO <sub>2</sub> .	Concreto arquitectónico en interiores y exteriores.

Tabla VII.6. Materiales y sistemas de reparación, refuerzo y protección.

## VII.21. CONCLUSIÓN

Básicamente la reparación de estructuras de concreto se base en la preparación del sustrato de concreto a reparar, la limpieza de la superficie a reparar, la impregnación de la superficie a reparar por un agente de adherencia, y la colocación del material de reparación propiamente dicho.

Sin embargo, debemos tomar en cuenta varios aspectos al llevar a cabo una reparación, como son: localización del elemento a reparar, el no incidir en el aumento de la carga muerta y viva para la construcción en su conjunto, y que este incida en el menor costo con los máximos beneficios.

Para la reparación de los diferentes elementos que constituyen una construcción, podemos optar por muchas técnicas existentes y que han dado muy buenos resultados, pero debemos tomar en cuenta que la solución menos complicada es aquellas que tendrá a su vez el menor costo.

Todas las técnicas de reparación, ofrecen ventajas pero también limitaciones, por tal motivo debemos buscar una solución que vaya acorde con la vida residual de la estructura. Pero, también debemos tomar en cuenta el tipo de construcción a reparar, ya que no se recomienda utilizar el mismo procedimiento de reparación para una pequeña vivienda de uno o dos niveles al que se pudiera utilizar para un edificio, ya que esto repercutirá económicamente.

También debemos recalcar el hecho de que, una lesión considerada como menor puede derivar en una lesión mayor, por tal motivo a pesar de no significar en principio un gran peligro, el no ejecutar la reparación en su momento, puede incidir directamente en un mal funcionamiento de la construcción de concreto.



---

## CONCLUSIONES FINALES

**Primera.** El proceso patológico que presenta una estructura de concreto es muy variado, de acuerdo a los factores intrínsecos y extrínsecos que ejercen una influencia directa sobre las estructuras de concreto, además de los materiales que la conforman.

**Segunda.** La «patología de la construcción», trata a la construcción como un ente, que está en constante cambio, y por tal motivo puede presentar síntomas de enfermedades y lesiones, la cuales requieren la intervención de personal especializado para suprimir estas enfermedades y lesiones.

**Tercero.** La «patología de la construcción» es la ciencia encargada de dar soluciones ante la presencia de síntomas y lesiones en una construcción, por tal motivo el personal que interviene debe conocer el mecanismo degenerativo y origen de las enfermedades y lesiones. Hacer los estudios, ensayos y análisis necesarios para un buen diagnóstico, y de esta forma evaluar e intervenir en el proceso de rehabilitación.

**Cuarto.** El presente trabajo se enfocó principalmente a los daños y fallas (lesiones y enfermedades) que en su conjunto forman el proceso patológico y que aparecen en las estructuras de concreto, sin embargo, no debemos perder de vista que las construcciones alrededor de mundo estas constituidas por muy diversos materiales (acero, madera, materiales de reciclaje, por mencionar sólo algunos) y cada vez aparecen nuevos, por tal motivo en dichas construcciones se pueden presentar muy diversas patologías.

**Quinta.** La «patología de la construcción» puede ayudar a los ingenieros proyectistas, a predecir con cierta exactitud, las lesiones y enfermedades que presentará una construcción para que de esta forma sea capaz de prevenirlas y suprimirlas. Sin embargo, debemos tener presente que prácticamente toda estructura de concreto en alguna etapa de su vida útil presentará alguna enfermedad o lesión, pero también, por lo general, estas lesiones que en principio se pueden juzgarse como menores, si no se atienden en su momento, pueden degenerar y convertirse en verdaderas enfermedades y lesiones que pueden poner en peligro la construcción, ya sea parcial o total. Por tal motivo, es fundamental que ingeniero conozca el mecanismo y origen de las enfermedades y lesiones que puede presentar una construcción.

**Sexta.** Además, debemos tomar en cuenta, que muchas de las enfermedades y lesiones que presenta una construcción, son debidas a un mal proyecto y ejecución, por tal motivo, debemos tener poner especial cuidado, al concebir un diseño, ya que éste debe ser estudiado y analizado con las debidas precauciones, y no descartar información que pudiera ayudarnos a predecir el comportamiento de la construcción en el futuro ante diversas acciones.

**Séptima.** La patología de la construcción nos suministrar información sobre la compatibilidad de los diferentes materiales usados, el uso adecuado y sobre todo los primeros síntomas que pudiera presentar un elemento de la construcción debido a una anomalía ya desea por deficiencias en el proyecto o los materiales empleados, para así poder juzgar si se requiere llevar a cabo pruebas adicionales, y de esta forma estar en posibilidades de hacer las correcciones necesarias.

**Octava.** El presente trabajo fue diseñado como una mera introducción al tema de la «Patología de la construcción», y puede servir a aquellas personas que estén en contacto directo con la industria de la construcción, y en especial a aquellas que le interesen las diferentes anomalías que pudiera presentar una construcción de concreto bajo diversos factores que inciden en sus elementos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Dr. Ing. Paulo R. do Lago Elene.  
Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto.  
Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.  
Primera edición, 1997; México, D.F.
- Ing. Felipe de Jesús García Rodríguez  
Evaluación de estructuras de concreto.  
Técnicas y materiales para su reparación.  
Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. A.C.  
Primera edición, 2002; México, D.F.
- Juan de Cusa.  
Reparación de lesiones en edificios.  
Ediciones CEAC, S.A.  
1ª Edición; Marzo 1991; Barcelona, España.
- Friedrich Eichler.  
Patología de la construcción. Detalles constructivos.  
Editorial Blume.  
Versión española de la 2ª edición alemana; 1987.  
Barcelona, España.
- Diego Sánchez de Guzmán.  
Durabilidad y patología del concreto.  
Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO)  
Segunda reimpresión; 2006; Colombia, Bogotá.
- Sara M. Cerrud Sánchez,  
Víctor H. Jacobo Armendáriz,  
Armando Ortiz Prado,  
Rafael Schuwenaars Fralssens.  
Corrosión y protección.  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Facultad de Ingeniería.  
Primera impresión; Julio de 2003; Mexico, D.F.
- Adam M. Neville.  
Tecnología del concreto.  
Editorial Trillas.  
Primera edición; 1998.  
México, D.F.
- Oscar de Buen López de Heredia.  
Estructuras de acero.  
Editorial Limusa.  
Primera edición; 1990.  
México, D.F.



- Roberto Meli.  
Diseño estructural.  
Editorial Limusa.  
Segunda edición; 2006.  
México, D.F.
- Gabriel O. Gallo Ortiz, Luis I. Espinoza Márquez.  
Diseño estructural de casa habitación.  
Editorial Mc-Graw Hill  
Primera edición; 1997.  
México, D.F.
- Arthur H. Nilson, George Winter, Luis Eduardo Yamin L. y Jairo.  
Diseño de estructuras de concreto.  
Editorial Mc-Graw Hill  
12º edición; 1999  
México. D.F.
- Ing. Marco Aurelio Torres H.  
Concreto. Diseño plástico. Teoría elástica.  
Editorial Patria.  
Primera edición; 1993.  
México.
- Jack C. McCorman.  
Diseño de concreto reforzado.  
Editorial Alfaomega  
Cuarta edición; 2002.  
México, D.F.
- Aslam Kassimali.  
Análisis estructural.  
Editorial Thomsom Learning.  
Segunda edición; 2001.  
México, D.F.
- Eulalio Juárez Badillo.  
Alfonso Rico Rodríguez.  
Mecánica de suelos.  
Tomo I.  
Fundamentos de la mecánica de suelos.  
Editorial Limusa.  
2º edición; 1991.  
México, D.F.
- Eulalio Juárez Badillo.  
Alfonso Rico Rodríguez.  
Mecánica de suelos.  
Tomo II.  
Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos.  
Editorial Limusa.  
2º edición; 1991.  
México, D.F.

- Efraín Ovando Shelley.  
Francisco González Valencia.  
Subsuelo de la cuenta del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.  
Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos.  
México, 1990.
- Diseño de estructuras de concreto conforme al reglamento ACI 318-89.  
Editado por Instituto Mexicano del cemento y del concreto A.C.
- Peter H. Emmons.  
Manual ilustrativo de reparación y mantenimiento del concreto.  
Análisis de problemas. Estrategias y técnicas de reparación.  
Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.  
Primera edición, 2005.
- Cordinador: Pedro Castro Borges.  
Infraestructura de concreto armado: deterioro y opciones de preservación.  
Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.  
Primera edición, 2001.
- <http://www.cruzazul.com.mx>.
- <http://www.onncce.org.mx>.
- [http://www.asefa.es/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=3&id23&Itemid=45](http://www.asefa.es/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=3&id23&Itemid=45)
- <http://www.docstoc.com/docs/33413388/ENCICLOPEDIA-BROTO-DE-PATOLOGIAS-DE-LA-CONSTRUCCION>
- <http://www.monografias.com/trabajos6/esra/esra.shtml>