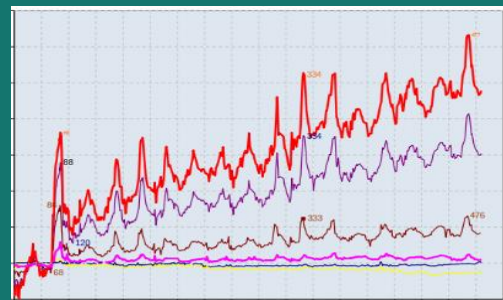
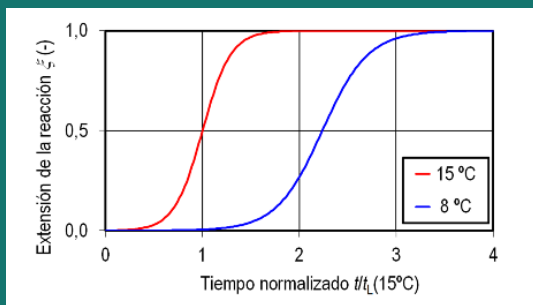
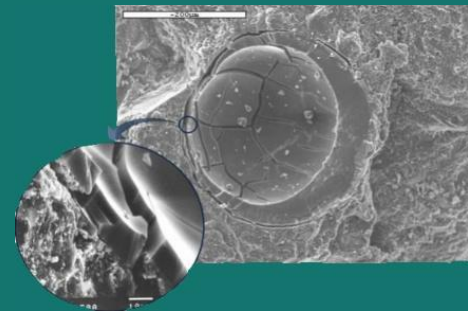
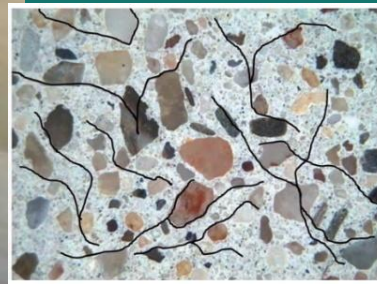


Reacciones Expansivas en Presas de Hormigón



Comité Nacional Español de Grandes Presas



MONOGRAFÍA SOBRE REACCIONES EXPANSIVAS EN PRESAS DE HORMIGÓN

Esta Monografía tiene por objeto aportar información, conocimientos y estrategias de actuación a los propietarios, responsables y técnicos relacionados con la inspección, conservación, mantenimiento y evaluación de las presas de hormigón, en lo que respecta a la problemática asociada a los procesos expansivos que pueden ocasionar deterioro en su estructura principal o en otros elementos auxiliares

© SPANCOLD 2025

ÍNDICE

PRÓLOGO	6
AGRADECIMIENTOS	8
AUTORES	9
Introducción	9
1. Situación general en España sobre procesos expansivos – Ejemplos de reacción árido-álcali	11
1.1. <i>Incidencia de las reacciones expansivas internas en el hormigón en España</i>	11
1.1.1. <i>Características de los áridos en la Península Ibérica</i>	11
1.1.2. <i>Tipología de estructuras afectadas en España</i>	13
1.1.3. <i>Zonificación de casos de reacciones expansivas en el hormigón en España</i>	14
1.2. <i>Incidencia de las reacciones expansivas en presas y estructuras hidráulicas</i>	15
1.2.1. <i>Incidencia de las reacciones expansivas en estructuras hidráulicas a nivel internacional</i>	15
1.2.2. <i>Recomendaciones RILEM para la prevención de reacciones expansivas en el hormigón de estructuras hidráulicas</i>	16
1.2.3. <i>Incidencia de las reacciones expansivas en estructuras hidráulicas en España</i> ...	17
1.2.4. <i>Consideraciones para la prevención de la reacción álcali-sílice en presas en España</i>	19
1.3. <i>¿Cuándo hay patología?</i>	20
1.4. <i>Bibliografía</i>	21
2. Mecanismos de deterioro	23
2.1. <i>Expansión vs daño por procesos expansivos (expansividad)</i>	23
2.2. <i>Reacción álcali-sílice</i>	23
2.2.1. <i>Descripción del mecanismo de deterioro de la reacción árido-álcali</i>	24
2.2.1.1. <i>Reactividad de los áridos</i>	28
2.2.1.2. <i>Contenido de alcalinos</i>	30
2.2.1.3. <i>Efecto del agua y la humedad</i>	32
2.2.2. <i>Reacción silicato-álcali vs reacción álcali-sílice</i>	33
2.2.3. <i>Reacción carbonato-álcali</i>	34
2.3. <i>Reacción por ataque interno de sulfatos</i>	34
2.3.1. <i>Tipos de reacciones asociadas a la presencia de sulfatos en el hormigón</i>	34
2.3.2. <i>Descripción del mecanismo de deterioro debido a ataque interno por sulfatos</i> ..	36
2.3.2.1. <i>Reacción de formación de etringita</i>	37

2.3.2.2.	<i>Reacción de oxidación de áridos de tipo pirlita</i>	37
2.3.3.	<i>Formación de etringita por la presencia de sulfatos en el hormigón</i>	38
2.3.3.1.	<i>Expansión y expansividad en el hormigón (daño) debido a la formación de etringita</i>	38
2.4.	<i>Simultaneidad de reacciones RAS y AIS</i>	44
2.5.	<i>Bibliografía</i>	44
3.	<i>Prevención</i>	47
3.1.	<i>Prevención de la reacción álcali-sílice</i>	47
3.1.1.	<i>España. Código Estructural, Instrucción EHE-08, normas UNE y metodología avanzada de prevención</i>	47
3.1.1.1.	<i>Código Estructural e Instrucción EHE-08</i>	47
3.1.1.2.	<i>Otras normas UNE para la evaluación de la reacción árido-álcali</i>	50
3.1.1.3.	<i>Metodología avanzada de diseño de mezclas de hormigón no expansivas, Monografía IETcc-CSIC</i>	52
3.1.1.3.1.	<i>Diseño de mezclas de hormigón no expansivas</i>	52
3.1.1.3.2.	<i>Metodología avanzada de prevención de la reacción álcali-sílice. Estrategia prestacional</i>	53
3.1.2.	<i>Estrategias de prevención a nivel internacional</i>	54
3.1.2.1.	<i>Francia. Normativa AFNOR</i>	54
3.1.2.2.	<i>Norteamérica. Normativa ASTM y recomendaciones AASHTO</i>	56
3.1.2.3.	<i>RILEM. Recomendaciones, procedimientos de ensayo y estrategia de prevención de la reacción árido-álcali</i>	57
3.2.	<i>Prevención del ataque interno de sulfatos</i>	60
3.2.1.	<i>Estrategia de prevención española – Instrucción EHE-08</i>	60
3.2.2.	<i>Otras estrategias de prevención</i>	61
3.3.	<i>Bibliografía</i>	62
4.	<i>Detección</i>	66
4.1.	<i>Inspecciones visuales</i>	66
4.2.	<i>Efectos de envejecimiento principales en presas, aspectos macro, meso y microestructurales</i>	84
4.3.	<i>Sistemas de auscultación para detección</i>	89
4.3.1.	<i>Instrumentación básica</i>	90
4.3.2.	<i>Instrumentación intermedia</i>	96

4.3.3.	<i>Instrumentación específica</i>	101
4.3.4.	<i>Conclusiones</i>	101
4.4.	<i>Bibliografía</i>	101
5.	<i>Diagnos</i>	103
5.1.	<i>Información del archivo técnico de la presa</i>	103
5.2.	<i>Selección y toma de muestras</i>	105
5.2.1.	<i>Recopilación de datos de la estructura</i>	105
5.2.2.	<i>Nivel de riesgo de la estructura</i>	106
5.2.3.	<i>Trabajos in situ</i>	108
5.2.4.	<i>Extracción de testigos</i>	111
5.3.	<i>Análisis macroscópico de las presas para la selección de muestras para su ensayo en laboratorios</i>	114
5.3.1.	<i>Catalogación y análisis macroscópico de los testigos para su ensayo en el laboratorio</i>	114
5.3.2.	<i>Técnicas de distribución de daño analizadas in situ. Índices de fisuración macroscópicas</i>	115
5.4.	<i>Análisis meso y microscópico de la presencia de reacciones expansivas en laboratorio</i>	117
5.4.1.	<i>Caracterización estereomicroscopía y por microscopía óptica</i>	117
5.4.2.	<i>Caracterización por microscopía electrónica</i>	118
5.4.3.	<i>Caracterización fisicoquímica</i>	120
5.4.4.	<i>Otras de técnicas de evaluación</i>	120
5.4.5.	<i>Nivel de daño del hormigón</i>	121
5.4.5.1.	<i>Índice de daño relativo (DRI) (Norteamérica)</i>	122
5.4.5.2.	<i>Nivel de daño por reacción árido-álcali (DL-RAA) y por ataque interno por sulfatos (DL-AIS) (España)</i>	123
5.5.	<i>Análisis de la información de ensayos complementarios de laboratorio</i>	124
5.6.	<i>Bibliografía</i>	124
6.	<i>Modelización</i>	126
6.1.	<i>Modelos estadísticos de los datos de auscultación</i>	126
6.1.1.	<i>Modelos de regresión multineal y variables explicativas</i>	127
6.1.1.1.	<i>Nivel de embalse</i>	128
6.1.1.2.	<i>Temperaturas</i>	129

6.1.1.3. Evolución en el tiempo	131
6.1.2. Modelos autorregresivos y media móvil	135
6.2. Modelos constitutivos	137
6.2.1. Escalas de aproximación.....	137
6.2.2. Modelos de reacción expansiva	138
6.2.3. Modelos mecánicos de hormigón.....	140
6.3. Análisis estructural.....	140
6.3.1. Método de los elementos finitos.....	141
6.3.2. Interacciones en juntas y con el terreno	142
6.3.3. Análisis termoquímico-mecánico	143
6.3.4. Calibración y validación.....	143
6.4. Experiencias en España	144
6.4.1. Modelos de presas afectadas por reacción árido-álcali	145
6.4.2. Modelos de presas afectadas por ataque sulfático.....	146
6.4.3. Modelo de presa afectada por varias reacciones.....	147
6.5. Bibliografía	147
7. Control y mitigación	149
7.1. Ampliación de la instrumentación	149
7.1.1. Instrumentación para control y verificación de eficacia de actuaciones	161
7.2. Actuaciones en presas	162
7.2.1. Rehabilitación de la red de drenaje.....	163
7.2.2. Inyecciones	163
7.2.3. Impermeabilización.....	165
7.2.4. Cortes de relajación.....	168
7.2.5. Anclajes	169
7.2.6. Sales de litio y otros productos de mitigación	171
7.3. Verificación de la eficacia de las actuaciones	172
7.4. Bibliografía	173

PRÓLOGO

Esta Monografía está redactada como un documento de consulta, de tal manera que pueda aportar conocimientos prácticos para los propietarios, responsables y técnicos relacionados con las presas de hormigón, en diversos aspectos asociados con problemas de expansión en su estructura principal o elementos auxiliares de hormigón.

La Monografía está compuesto por 7 Capítulos. El **Capítulo 1** (Situación general en España sobre Procesos Expansivos) consta de una introducción sobre la singularidad de las presas como estructuras de hormigón con gran volumen en masa, las características de esta tipología en el comportamiento frente al desarrollo de las reacciones expansivas con el tiempo y sus particularidades. Así mismo, se incluye una descripción de los áridos afectados y, por tanto, define las zonas afectadas de forma fundamental en España (España Silíceo). El **Capítulo 2** (Mecanismos de Deterioro) describe sucintamente los mecanismos de expansión identificados fundamentalmente en las presas, reacción álcali-sílice y, con menor incidencia, ataque interno por sulfatos. Se analizan los principales factores relacionados con los componentes del hormigón y con las condiciones medioambientales y tensionales que influyen en la aparición y progresión de los procesos expansivos. El **Capítulo 3** (Prevención) hace un repaso de la principal normativa y reglamentación nacional e internacional, no solo enumerando normas y procedimientos, sino también analizando la estrategia de cada sistema para prevenir el proceso expansivo. El **Capítulo 4** (Detección) hace una descripción de los instrumentos y herramientas que llevan a los técnicos de una presa a sospechar de la existencia de reacciones expansivas en el hormigón de una presa, que tendrá que ser corroborada por especialistas posteriormente. La detección comienza, generalmente, por datos sospechosos mostrados por análisis de los instrumentos de evaluación rutinaria de la presa (como desplazamientos no reversibles). Estos datos se obtienen con la instrumentación básica, la instrumentación intermedia y la instrumentación específica, si la presa dispone de ellas. En este Capítulo 4 se describe cada tipo de instrumentación y sus utilidades. El **Capítulo 5** (Diagnóstico) corresponde a las actuaciones que permiten identificar y caracterizar el daño existente a partir de información histórica y de ensayos de muestras de testigos extraídos de la estructura con un análisis a nivel vista macro, meso y microscópico. El **Capítulo 6** (Modelización) analiza esta temática, que es una de las que más está evolucionando en los últimos años, tanto por la rapidez de cálculo, como por la complejidad y extensión de las variables utilizadas. Se ha tratado convenientemente desde los Modelos Estadísticos de los datos de auscultación, a Modelos Constitutivos, Análisis Estructural (incluidos los Análisis termoquímico-mecánico) y

finalmente Experiencias aplicadas en España. Finalmente, el **Capítulo 7** (Control y Mitigación) analiza estos parámetros, mediante la ampliación de instrumentación específica para cada presa particular o la aplicación de soluciones, cuya eficiencia habrá finalmente que verificar.

La Bibliografía se cita al final de cada Capítulo, para facilitar al lector encontrar las referencias para ampliar algún aspecto.

Esperanza Menéndez Méndez †

Vocal Colaborador del Comité Técnico de Presas de Hormigón de SPANCOLD

OCTUBRE 2024

DEDICATORIA

Apenas esta monografía fue concluida, y remitida a Reunión Plenaria de SPANCOLD para su aprobación, Esperanza falleció tras una larga enfermedad. Descanse en paz.

Esperanza ha sido fundamental en la elaboración del presente documento, dirigiendo su redacción de manera admirable.

Ha sido una gran pérdida que nos ha dejado profundamente entristecidos a todos los que la conocíamos. Era una persona excepcional, una excelente profesional, una trabajadora incansable y una gran amiga. En el Comité Técnico de Presas de Hormigón de SPANCOLD nos ha dejado un gran vacío, pero a la vez su buen trabajo y su buen recuerdo, que serán difíciles de olvidar.

Por ello, el equipo de redacción desea dedicar esta monografía a su memoria.



AGRADECIMIENTOS

La presente Monografía sobre “Reacciones Expansivas en Presas de Hormigón” se ha redactado bajo la dirección del Comité Técnico de Presas de Hormigón del Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP, SPANCOLD en inglés). La Monografía se inició siendo Director Técnico del Comité Juan Manuel Buil Sanz y se terminó siendo Director Técnico Rafael Ibáñez de Aldecoa Lorente.

El equipo de redacción, bajo la dirección y coordinación de Esperanza Menéndez Méndez, ha estado formado por los siguientes Vocales Colaboradores del Comité Técnico de Presas de Hormigón: Ana Blanco Álvarez, Jesús de Blas Calvo, Pedro López Sánchez, Ana Belén Martín Vacas, Esperanza Menéndez Méndez y Javier Rodríguez Soler y, adicionalmente, por los colaboradores externos Antonio Aguado de Cea y Alberto Sánchez Hidalgo .

Juan Manuel Buil Sanz y Arturo Gil García contribuyeron sustancialmente a los términos de referencia iniciales y, a este último, se le encomendó una revisión en detalle del documento final.

Los autores merecen nuestro mejor y más sincero reconocimiento por su formidable y desinteresada dedicación para poner su valioso conocimiento a disposición de la comunidad involucrada en el campo de las presas de hormigón.

Rafael Ibáñez de Aldecoa Lorente

Director Técnico del Comité Técnico de Presas de Hormigón de SPANCOLD

AUTORES:

COORDINADORA: Esperanza Menéndez Méndez		
CONTENIDOS	RESPONSABLES	PARTICIPANTES
Introducción	JR	
Capítulo 1	EM	JB
Capítulo 2	PL + EM	AB + AA
Capítulo 3	EM	PL
Capítulo 4	AM + EM	AS + AA + AB
Capítulo 5	EM	AM + PL
Capítulo 6	JR + JB	AM
Capítulo 7	AM	JB + JR + AS + AA + AB + PL
EM	→ Esperanza Menéndez Méndez † (IETcc-CSIC)	
AM	→ Ana Belén Martín Vacas (IBERDROLA)	
JR	→ Javier Rodríguez Soler (PRINCIPIA)	
JB	→ Jesús de Blas Calvo (SPANCOLD)	
PL	→ Pedro López Sánchez (INTEMAC)	
AA	→ Antonio Aguado de Cea (UPC)	
AB	→ Ana Blanco Álvarez (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY)	
AS	→ Alberto Sánchez Hidalgo (IBERDROLA)	
Revisión final: Arturo Gil García (SPANCOLD)		

Introducción

Las reacciones químicas expansivas en el hormigón son uno de los principales factores que pueden contribuir al deterioro de las presas. Generalmente el proceso es lento y gradual, tardando años en evidenciarse con aparición de fisuras y movimientos anómalos. No da lugar necesariamente a accidentes graves, pero la afección progresiva en la estructura no debe ignorarse por la relevancia de las posibles consecuencias en la seguridad resistente y funcional. Las reacciones químicas no solo son causantes de un envejecimiento del material (hormigón), sino también de la posible aparición de grandes esfuerzos internos ocasionados por las variaciones dimensionales y condiciones de compatibilidad. Su gestión en obras nuevas y existentes es fundamental para la construcción y el mantenimiento de estructuras durables y seguras en un marco de explotación sostenible.

La monografía aborda la problemática de manera integral tratando de ser útil para los distintos agentes involucrados y en todas las etapas, desde la prevención en el proyecto y construcción, seguido de la detección, diagnóstico y pronóstico de la patología, hasta las posibles actuaciones de control y mitigación que garanticen la fiabilidad requerida de la estructura.

La publicación está formada por siete capítulos. El primer capítulo introduce la problemática describiendo la incidencia en España de las reacciones expansivas en las infraestructuras y específicamente en las estructuras hidráulicas. El capítulo 2 describe las dos categorías principales de reacciones expansivas: reacciones álcali-sílice, con formación de geles que absorben agua; y de ataque interno por sulfatos, con cristalización de etringita. El tercer capítulo está dedicado a la prevención, proporcionando estrategias prescriptivas de los materiales o prestacionales a través de una evaluación integrada de los componentes del hormigón orientadas a evitar dicha patología.

Para estructuras existentes, el cuarto capítulo describe las actuaciones de detección de anomalías mediante inspección visual y obtención, recopilación y tratamiento de los datos producidos por el sistema de auscultación. La diagnosis es el objeto del capítulo 5, que permite caracterizar el daño existente y los mecanismos de degradación mediante análisis y ensayos de muestras de testigos representativos extraídos en zonas adecuadamente seleccionadas. El sexto capítulo se ocupa de la prognosis de la estructura en base al análisis estadístico de los datos de auscultación y a modelos macroscópicos de elementos finitos. Finalmente, el séptimo y último capítulo trata de las actuaciones de control y mitigación de la patología, y ofrece consideraciones sobre la valoración de su eficacia.

1. Situación general en España sobre procesos expansivos – Ejemplos de reacción árido-álcali

1.1. Incidencia de las reacciones expansivas internas en el hormigón en España

1.1.1. Características de los áridos en la Península Ibérica

Los áridos reactivos en la Península Ibérica son de reacción lenta, por lo tanto, el tiempo de aparición de los síntomas de alteración por reacción árido-álcali tardan varios años en aparecer (ACI, 1991, Menéndez, 2010, Fernandes et al, 2016). Debido a esto durante años se ha considerado que en España no había problemas significativos de reactividad en los áridos.

En la península ibérica hay fundamentalmente tres tipos de suelos y, por tanto, tres tipos de áridos asociados, silíceos, calizos y arcillosos. La zona silícea está situada principalmente en la mitad occidental de la península, mientras que las zonas calizas y arcillosas están mezcladas en el sur, el norte y la zona oriental de la península (IGME, 2018).

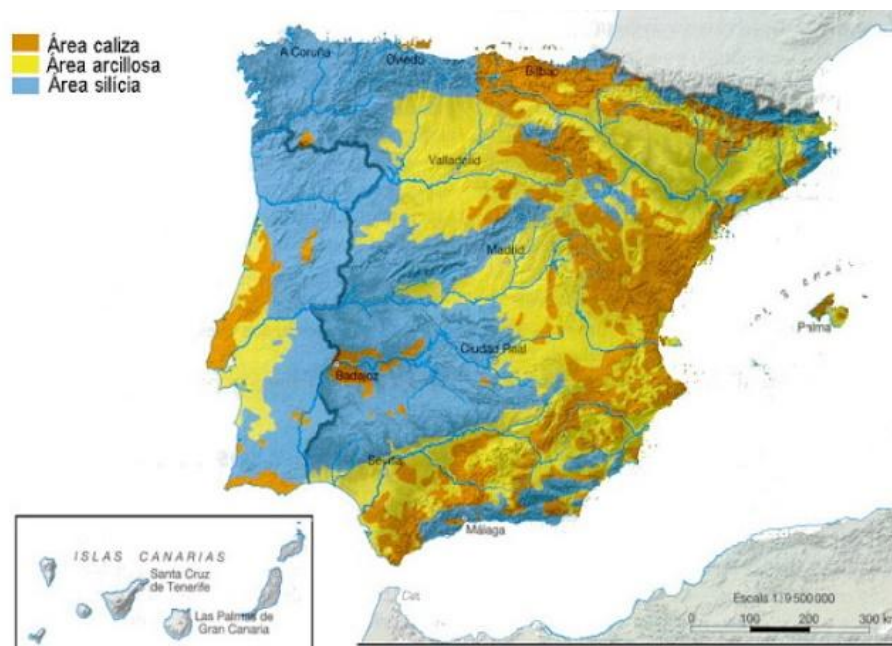


Figura 1.1. Distribución de suelos en la península ibérica (IGME, 2018).

Las zonas silíceas se centran fundamentalmente en el Macizo Galaico Portugués, el Sistema Central, Los Montes de Toledo y Sierra Morena. En estas zonas silíceas es donde se han localizado la mayor parte de los casos diagnosticados de reacción árido-álcali en España.



Figura 1.2. Cadenas montañosas con diferentes suelos en la península ibérica (IGME, 2018).

Existen diversos listados de minerales y rocas potencialmente reactivas que contienen los áridos asociados más frecuentemente con problemas de reacción árido-álcali, aunque otros áridos pueden contener en su composición algunos componentes susceptibles de reaccionar con los álcalis en el hormigón. En España se ha observado reacción árido-álcali en estructuras de hormigón con distintas tipologías de áridos, como los siguientes, basados en trabajos de E. Menéndez (CSIC) entre 1992 y 2019:

- *Áridos de tipo silíceo:*
 - Granitos y granodioritas
 - Gneises graníticos
 - Arenas y gravas silíceas
 - Cuarzitas
 - Areniscas
 - Basaltos
- *Áridos de tipo calizo:* Calizas con inclusiones de partículas silíceas, que contienen cuarzo con extinción ondulante.

Además, se ha observado ataque interno por sulfatos, debido a presencia de inclusiones de piritas en áridos calizos, granitos, granodioritas, arcillas tipo pizarra y calizas margosas (Majo Clavel, 1973).

En España los áridos reactivos son fundamentalmente rocas polifásicas con partículas reactivas de sílice, siendo estos por tanto de velocidad lenta (Menéndez, 2010 y 2019).

Según el registro de canteras del año 2012, en España hay aproximadamente 4.200 canteras; de las cuales las relacionadas con áridos silíceos, que podrían presentar reactividad, corresponden al 14,12% del total de explotaciones. Los áridos silíceos se distribuyen en los siguientes porcentajes que aparecen en la Figura 1.3 (ANEFA, 2012). Por otra parte, el porcentaje de explotaciones de áridos calizos constituye el 20,86% y de dolomías el 1,46%.

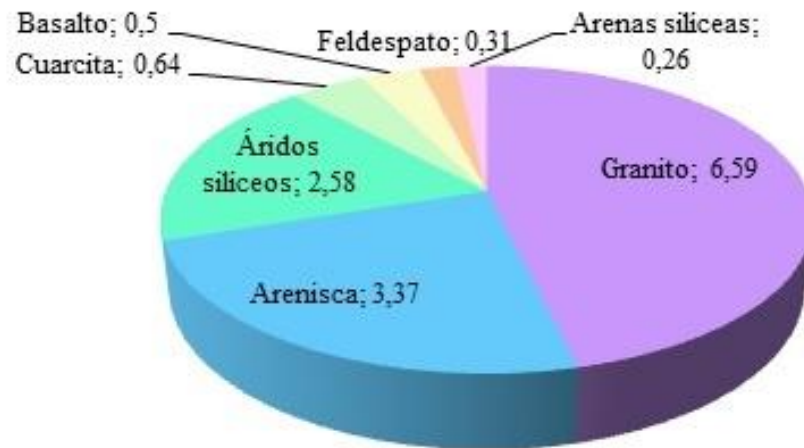


Figura 1.3. Distribución de canteras de diversos áridos silíceos (ANEFA, 2012).

Entre los áridos potencialmente reactivos hay que destacar los granitos, que son los que mayoritariamente han mostrado reactividad en el hormigón, especialmente en las presas. Las canteras de granito se localizan fundamentalmente en Galicia, Extremadura, Madrid, en zonas de Castilla-La Mancha (Toledo y Ciudad Real), de Castilla y León (Ávila, Salamanca, Segovia y Zamora) y de Andalucía (Huelva, Jaén y Sevilla).

1.1.2. Tipología de estructuras afectadas en España

Las principales estructuras afectadas por reacción árido-álcali en España están relacionadas fundamentalmente con los factores que afectan a la reacción, como la presencia de agua o humedad elevada, alta temperatura, grandes volúmenes de hormigón, viento, insolación y condiciones ambientales adversas.

Las principales tipologías de estructuras o elementos de hormigón afectados por la reacción árido-álcali son: las estructuras hidráulicas, elementos prefabricados, puentes (pilares y tableros) y pavimentos.

En particular las *obras hidráulicas* están sometidas a condiciones especialmente sensibles para el desarrollo de la reacción árido-álcali. Estas condiciones están asociadas con los siguientes aspectos:

- Grandes volúmenes de hormigón: Favorece la acumulación de tensiones debido a la formación de productos expansivos.
- Presencia constante de agua: La presencia de agua hace que se produzca una mayor expansión en caso de formarse productos de reacción.

- Presión hidrostática de agua: El agua accede a todo el volumen de hormigón debido a la presión hidrostática de la misma.
- Zonas con distintas condiciones ambientales: Hay zonas con mayor insolación, viento, etc. que pueden incidir favoreciendo el desarrollo desigual de la reacción.
- Cargas diferenciales: Zonas de hormigón más o menos comprimidas y con tensiones preferenciales en determinadas zonas.

Durante años se ha considerado que la reacción árido-álcali no tenía una incidencia significativa en España. Sin embargo, esto era debido principalmente a que una gran parte de los áridos de la península ibérica son áridos de reacción lenta, por lo que muchas de las alteraciones observadas han tardado en manifestarse, aunque también es debido a la deficiente identificación del fenómeno en algunas estructuras o elementos de hormigón.

Por otra parte, algunas de las primeras estructuras afectadas por reacción árido-álcali diagnosticadas corresponden a presas, en las que gran parte de los áridos son granitos. Estos áridos son de reacción lenta, sin embargo, el elevado volumen del hormigón de estas estructuras y la presencia constante de agua ha favorecido que se observasen las consecuencias de estos fenómenos expansivos y se identificase esta incidencia (Gil y Cajete, 1988, 1991; López et al, 2002, Segarra, 2005).

1.1.3. Zonificación de casos de reacciones expansivas en el hormigón en España

Los áridos más susceptibles de tener reactividad en España son los áridos graníticos, cuarcitas, areniscas y arenas y gravas silíceas; en general, muchos de ellos son áridos de reacción lenta por lo que tardan en manifestarse las alteraciones.

Se han detectado casos de reacción árido-álcali en diferentes tipos de estructuras en distintas zonas de España. Así mismo, existen áridos con inclusiones de piritas y pirrotinas que pueden generar ataque interno por sulfatos, debido a la oxidación de estas (Chinchón et al, 1995 y Casanova, et al 1996).

La distribución aproximada de casos detectados de reactividad árido-álcali en España se recoge en el mapa de la Figura 1.4.

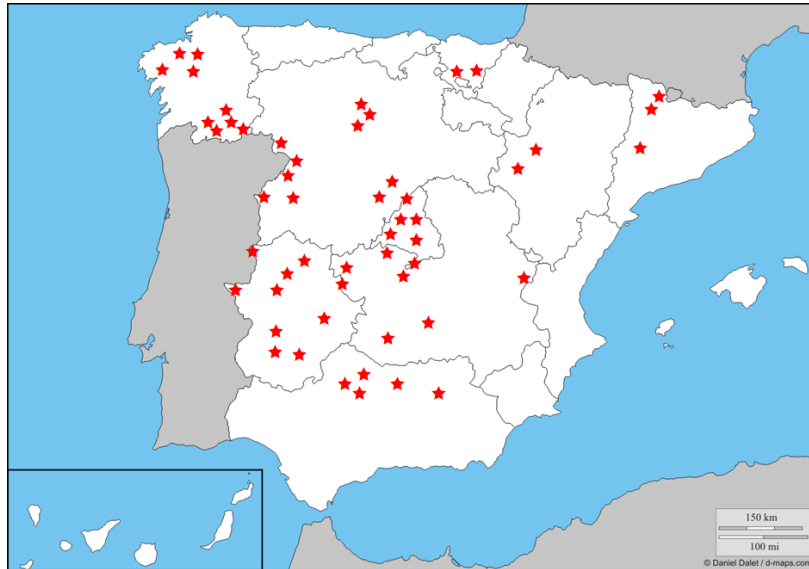


Figura 1.4. Zonas de España con diferentes tipos de estructuras afectadas por reacción árido-álcali, basado en trabajos de E. Menéndez (CSIC) entre 1992 y 2019

1.2. Incidencia de las reacciones expansivas en presas y estructuras hidráulicas

A continuación, se recoge una aproximación a la incidencia de la reacción árido-álcali a nivel internacional. Si bien hay que tener en cuenta que muchas de ellas no están declaradas y otras muchas ni siquiera están diagnosticadas.

1.2.1. Incidencia de las reacciones expansivas en estructuras hidráulicas a nivel internacional

Las presas y las estructuras hidráulicas, en general, son estructuras con una vida útil prevista muy extensa con relación a otras estructuras de hormigón. Sin embargo, los grandes volúmenes de hormigón, además de las condiciones de exposición con elevada presencia de agua, hacen que las presas sean estructuras especialmente sensibles al desarrollo de reacciones expansivas, como la reacción árido-álcali o el ataque externo por sulfatos.

En el proyecto europeo IALAD (Network of Integrity Assessment of Large Concrete Dams) (IALAD, 2004) se analizaron las causas de degradación de más de 200 presas a nivel internacional, analizándose las causas de alteración de estas y clasificándolas en cuatro grupos principales: a) degradación del hormigón y la mampostería (63 %), donde se encuentran encuadrados los cambios dimensionales, b) degradación mecánica e hidráulica de la cimentación (19 %), c) elevaciones debidas a causas adicionales (12 %) y d) envejecimientos de componentes, como anclajes y juntas, (6 %). Las causas de degradación del hormigón y de la mampostería se subdividen, a su vez, en deterioros debidos a cambios dimensionales, lixiviación, pérdida de estanqueidad y hielo-deshielo.

Analizando los datos recogidos en IALAD, 2004 y ACRES, 2006, se estima que aproximadamente el 30% de los casos de degradación en presas analizados están relacionados con el deterioro por reacciones expansivas tipo reacción árido-álcali y el ataque interno por sulfatos (Menéndez et al., 2011). Segarra, 2005, recoge 101 casos de presas afectadas por reacciones expansivas a nivel mundial. Charlwood y Sims, 2016, realiza una revisión de las 27 presas y estructuras hidráulicas internacionales afectadas por reacciones expansivas. En esta revisión se analiza la tipología de las presas, el tiempo en que se detectó la alteración y los niveles de expansión registrados; se referencian 8 presas de gravedad, 6 presas arco, 2 presas de contrafuertes, 6 desagües, 4 estaciones hidroeléctricas y 1 estructura de toma. Estos casos están considerados como los casos más significativos a nivel internacional. No obstante, se puede considerar que existe un gran número de presas con reacciones expansivas en las que no se ha diagnosticado todavía el fenómeno, bien por falta de recursos en la inspección y mantenimiento, o bien por desconocimiento de los síntomas específicos del fenómeno expansivo.

Basado en estos datos se puede considerar que el porcentaje de presas afectadas en Europa y otros países occidentales están en torno al 5-7%, No obstante, hay que tener en cuenta la incidencia de los tipos de áridos locales en las distintas zonas con presas afectadas.

En la Tabla 1.1 se recoge la distribución de casos por continentes, según los datos registrados por cada una de las fuentes analizadas.

Tabla 1.1. Distribución de casos de reacciones expansivas, por áreas geográficas.

Continentes/Área	Estructuras afectadas por reacciones expansivas internas		
	Segarra, 2005	Menéndez et al., 2011, basado en IALAD, 2004 y ACRES, 2006	Charlwood y Sims, 2016
Europa	25,7 %	57,4 %	29,6 %
Norteamérica	49,5 %	23,5 %	51,9 %
América del Sur	4 %	1,5 %	---
Asia	4 %	4,4 %	3,7 %
África	16,8 %	13,2 %	14,8 %
Nº total casos analizados	101	68	27

La diferente distribución de los casos identificados de estructuras hidráulicas, afectadas por fenómenos expansivos, en distintos continentes/áreas no obedece necesariamente a una diferencia significativa en la presencia de áridos reactivos, en la tipología del hormigón o en las condiciones ambientales o mecánicas de las estructuras. Estas diferencias en los casos diagnosticados están directamente relacionadas con la eficiencia e intensidad de la inspección y control en determinadas áreas o países, debido a los recursos destinados a la inspección y mantenimiento y a los requerimientos legales en distintos países.

1.2.2. Recomendaciones RILEM para la prevención de reacciones expansivas en el hormigón de estructuras hidráulicas

En el punto 3.1.2.3, del Capítulo 3 de esta Monografía, se recogen los detalles relativos a las recomendaciones RILEM, para la prevención de las reacciones expansivas en el hormigón.

El documento RILEM AAR-7.3 amplía las recomendaciones del documento RILEM AAR-7.1, particularizándolas para las obras hidráulicas y para las obras expuestas a un ambiente agresivo por un periodo largo de tiempo en general (Nixon y Sims, 2016).

Las presas se consideran estructuras especialmente sensibles, por lo que se le aplica un nivel de precaución **P4** (nivel de precaución extraordinario), esto es debido a la gran importancia de su estabilidad estructural, su previsión de muy larga vida en servicio y por estar permanente expuestas a elevados contenidos de humedad. Según el nivel **P4** de precaución hay que aplicar dos o más de las medidas de prevención, denominadas M1, M2, M3 y M4.

Además, hay que tener en cuenta algunas particularidades de las presas y algunos factores específicos relacionados con estas estructuras y el desarrollo de la reacción árido-álcali:

- Las reacciones lentas pueden progresar y generar expansiones significativas, debido a la elevada vida de servicio y al elevado volumen de hormigón.
- En las grandes estructuras no se produce la lixiviación de álcalis que puede producirse en los ensayos acelerados.
- Las presas tienen una elevada exigencia de estabilidad estructural.
- El hormigón está permanentemente en contacto con la humedad, si bien hay medidas de protección que pueden aplicarse.
- Las presas se construyen en muchos casos en lugares remotos, por lo que hay un limitado acceso a los componentes del hormigón, especialmente a los áridos.
- La restricción horizontal impuesta, por el contacto de la presa con la roca, en los estribos pueden producir que se incline o se doble debido a la expansión, especialmente en las presas arco o en las presas arco-gravedad que tienen el eje curvado.
- Las expansiones producidas en el hormigón pueden producir problemas en las conexiones de los vertederos, compuertas, mecanismos y otras instalaciones.

En este documento RILEM AAR-7.3 se recoge adicionalmente una Tabla con las medidas preventivas propuesta y el criterio a aplicar en cada una de ellas.

1.2.3. Incidencia de las reacciones expansivas en estructuras hidráulicas en España

En España existen más de 1.200 presas, de las que más del 70% corresponde a presas de tipo gravedad y fueron construidas entre los años 1950 y 2000. Por su parte, debido a la orografía y la climatología de la península ibérica, la mayoría de las presas en España tienen una altura inferior a 60 metros y un volumen de agua embalsada relativamente pequeño, especialmente si se compara con muchas de las presas situadas en África o América (Menéndez, 2013 y 2019).

En España se han identificado más de 30 casos de presas y estructuras hidráulicas afectadas por reacciones expansivas, siendo más del 60% de los hormigones dañados correspondientes a cuerpos de presas. Mientras que en menor medida se encuentran daños en estructuras de toma, aliviaderos, centrales hidroeléctricas y canales. En cuanto a la edad de las estructuras

afectadas, esta se sitúa entre 40 y 60 años, tardando en mostrar síntomas generalmente más de 10 años, lo que concuerda con la tipología de áridos de reacción lenta, como los granitos, presentes en muchos lugares de España.

En cuanto a los componentes de los hormigones afectados por reacciones expansivas, los áridos son mayoritariamente de tipo granítico, con alteración, además de cuarcitas, calizas con inclusiones silíceas y calizas o pizarras con inclusiones de piritas o pirrotinas. Mientras que los cementos utilizados son generalmente cementos Portland sin adición, que eran los utilizados en la época de construcción de estas estructuras afectadas. En cuanto al contenido de álcalis de los cementos, solían estar en torno al 1%, si bien no se controlaban de forma específica y, además los feldespatos presentes en algunos áridos lixivian álcalis con el tiempo influyendo en el desarrollo de la reacción árido-álcali (Menéndez et al, 2012). Con relación al tipo de reacción expansiva, observada en las presas y estructuras hidráulicas españolas, principalmente se ha diagnosticado reacción álcali-sílice, si bien se han identificado varios casos de ataque interno por sulfatos, debido a la oxidación de piritas y pirrotinas (Chinchón et al, 1995 y Casanova et al, 1996).

Con relación a los movimientos observados, en las presas y estructuras hidráulicas afectadas por reacciones expansivas en España, se aprecian elevaciones comprendidas entre 0,2 mm/año y 2,9 mm/año en presas de gravedad; entre 0,3 mm/año y 1,5 mm/año en presas de arco-gravedad, entre 0,5 mm/año y 1,7 mm/año en presas de contrafuertes y hasta valores superiores a 3 mm/año en estructuras de toma, desagües y canales (Menéndez, 2013), en base a la información proporcionada por propietarios y responsables de estructuras afectadas.

En cuanto a las zonas de España en las que se encuentran situadas las presas y estructuras hidráulicas afectadas por reacciones expansivas, estas se localizan fundamentalmente en las zonas con terrenos silíceos de la Península, destacando las zonas con árido granítico. En la Figura 1.5 se representan las áreas de España con presas y estructuras hidráulicas afectadas por reacciones expansivas internas en España (Gil, 2007, Menéndez, 2013 y 2019).

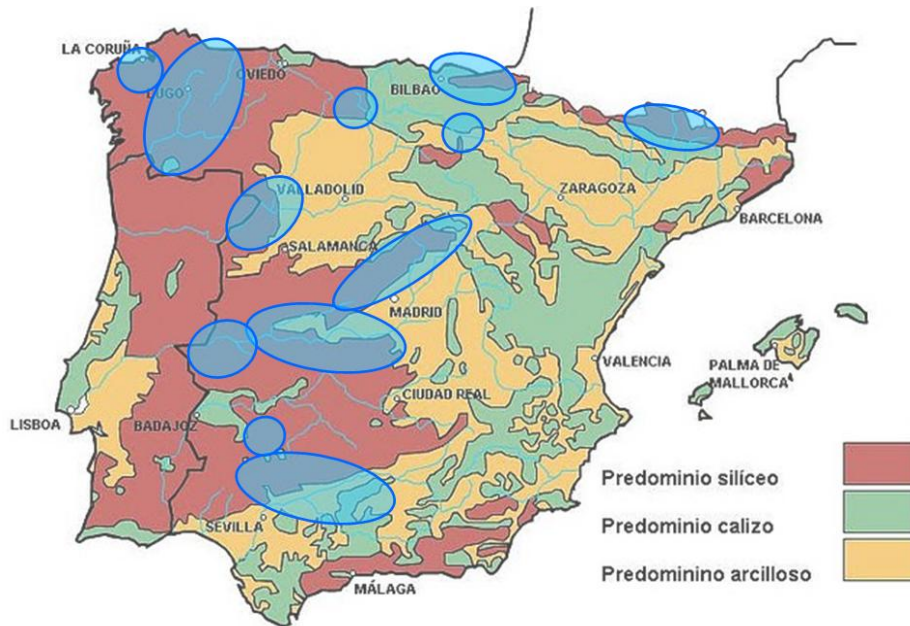


Figura 1.5. Áreas con estructuras hidráulicas afectadas por reacción árido-álcali en España (Gil, 2007 y Menéndez, 2013 y 2019).

1.2.4. Consideraciones para la prevención de la reacción álcali-sílice en presas en España

En el punto 3.1.1.3, del Capítulo 3 de esta Monografía, se recogen los detalles relativos al Código Estructural (MITMA, 2021) y otras recomendaciones españolas como normas UNE y la Monografía N.º 430 del IETcc-CSIC (Menéndez, 2019).

En esta Monografía N.º 430 del IETcc-CSIC (Menéndez, 2019) se recogen literalmente las siguientes consideraciones, relativas a las presas en España.

- Particularidades de los componentes del hormigón de presas:
 - Tipología de áridos: *En muchas zonas de España y de la Península Ibérica en general, hay áridos con feldespatos, como los áridos graníticos. En estos casos hay que tener en cuenta, además de la reactividad de los áridos, la potencial extracción de álcalis con el tiempo, especialmente en las condiciones de agua filtrante como en las presas. Por otra parte, muchos de estos áridos son de velocidad lenta, por lo que los ensayos de expansión pueden quedar en el límite para ser calificado como potencialmente reactivos; por lo habría que hacer ensayos complementarios y verificar las mezclas de hormigón.*
 - Adiciones al cemento o al hormigón: *De forma habitual se han utilizan cenizas volantes en el hormigón de presas, para conseguir unas características adecuadas y controlar el calor de hidratación producido, además de moderar la expansividad cuando hay áridos reactivos. Sin embargo, cuando se produce una escasez de este tipo de adiciones es necesario optar por el uso de otros tipos de adiciones. Para diferentes tipos de adiciones hay que tener en cuenta su eficiencia en el control de la expansión,*

- *y el porcentaje de sustitución necesario para obtener un mismo grado de mitigación de la expansión. Además, hay que tener en cuenta la potencial extracción de álcalis desde las adiciones a largo plazo.*
- *Particularidades de los ensayos para la prevención de la expansión en el hormigón de presas:*
 - *Petrografía de los áridos:* *El análisis petrográfico de los áridos puede ser poco definitorio, en lo relativo a la reacción árido-álcali, cuando se utiliza la norma mencionada en el Código Estructural (norma UNE-EN 932-3). Por tanto, para obtener información sobre la potencial reactividad de los álcalis se recomienda la utilización del método petrográfico específico para analizar estas reacciones, como el método RILEM AAR-1.1 (Nixon y Sims, 2016) o incluso realizar análisis específicos sobre el índice de reactividad de los cuarzos (Menéndez et al, 2012).*
 - *Calificación de la reactividad de áridos y de mezclas de áridos:* *Además del análisis de los áridos, mediante el método acelerado de barras de mortero (norma UNE 146508), se puede considerar el diseño y la evaluación de mezclas de áridos con diferente reactividad, para obtener mezclas no reactivas, utilizando la norma UNE 83968, para tantear los porcentajes de mezclas de áridos adecuada.*
 - *Análisis de la eficiencia de las adiciones:* *El uso de adiciones en el cemento o en el hormigón modera la expansión de los hormigones con áridos expansivos. No obstante, es necesario evaluar la eficiencia en la moderación de la expansión, bien de diferentes tipos de adiciones o bien de distintos porcentajes de sustitución. Para ello se puede utilizar el ensayo de la norma UNE 83969.*
 - *Verificación de mezclas de hormigón:* *Para evitar la expansión de las mezclas de hormigón es necesario verificar las mezclas de hormigón a utilizar en la presa, para lo que se recomienda aplicar el ensayo de la norma UNE 83967, con un límite de expansión de 0,02% a las 20 semanas, utilizando los álcalis suplementarios potencialmente lixiviables de los áridos y de las adiciones.*

1.3. ¿Cuándo hay patología?

La segunda acepción de patología en el *diccionario de la lengua española* (R.A.E. 2014) es “Conjunto de síntomas de una enfermedad”. La definición es suficiente para el objetivo que nos ocupa si somos capaces de precisar las dos palabras clave: síntomas y enfermedad.

Una parte muy importante de este trabajo trata sobre la detección e interpretación de los síntomas; respecto a la enfermedad, el diccionario nos ilustra de nuevo con su tercera acepción: “Anormalidad dañosa en el funcionamiento de una institución, colectividad, etc.”

Incluyendo, legítimamente, los hormigones de presa en el etcétera final, la definición nos conduce finalmente a establecer bajo qué circunstancias las reacciones expansivas deben ser consideradas patológicas: cuando la anomalía en el funcionamiento sea dañosa.

(Anormalidad se relaciona directamente con *Norma* y, por tanto, el que la reacción expansiva –si se ha detectado– no esté dentro de las previsiones de la normativa solo será considerada patológica si hay un cambio).

1.4. Bibliografía

- ACI Committee 201 (1991): *Proposed revisions of: Guide to Durable Concrete*, ACI Materials Journal, 88(5), pp. 544-582
- ACRES (2006): <http://www.acres.com/AcresGroup/Services/ServHydroAAR/indcnt.htm>
- ANEFA (2012): *Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos*, <http://www.aridos.org/>
- AAR-1.1 (2016) Detection of potential alkali-reactivity Part 1: petrographic examination method. RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures. State-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. Ed. Springer
- Casanova, I., Agullo, L. y Aguado, A. (1996): “Aggregate expansivity due to sulfide oxidation. Reaction system and rate model”, *Cem. Concr. Res.*, 26 (7), pp. 993–998
- Charlwood, R. G. and Sims, I., (2016). “Expansive chemical reactions in dams and hydroelectric projects.” In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169(4), pp. 197-205
- Chinchón, J.S., Ayora, C., Aguado, A. y Guirado, F. (1995): “Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability”, *Cem. Concr. Res.*, 25 (6), pp. 1264–1272
- Código Estructural (2021): MITMA. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio
- Fernandes, I., Ribeiro, M.A., Broekmans, M. y Sims, I. (2016): *Petrographic Atlas: Characterization of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis: RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for Use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method*, Ed. Springer
- Gil, A. y Cajete, J. (1988): “Revisión general y actuaciones en la presa de San Esteban”, *Revista de Obras Públicas*, Abril – Mayo
- Gil, A. y Cajete, J. (1991): “Study the interaction aggregate-paste in the concrete at the San Esteban Dam”, en *XVII Congreso Internacional de Grandes Presas, ICOLD*, Viena
- Gil, A. (2007): Workshop on *Chemical expansion of concrete in dams and hydroelectric projects*. Icolad Committee on Concrete Dams and Hydro 2007, Granada, Spain
- IAGUA (2013): *Infraestructuras, presas*, www.iagua.es
- IALAD (2004): *Network of Integrity Assessment of Large Concrete Dams*, www.ialad.com
- IGME (2018): *Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad*, <http://www.igme.es/>
- López J., Rubio S. y Ortuño M. (2002): “Incremento de regulación mediante la implantación de desagües intermedios. Adecuación de las presas de Escalona y Contreras”, *Dam Maintenance and Rehabilitation. Proceedings of the International Congress on Conservation and Rehabilitation of dams*, Madrid
- Majo Clavel, N. (1973): “Reflexiones sobre el caso de las piritas del Maresme”, *Materiales de Construcción*, 23, pp. 150-151
- Mapama (2013): *Inventario de presas y embalses, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*
- Menéndez E., Aldea B. y Márquez C. (2009): *Base de datos. Presas afectadas por diferentes deterioros a nivel mundial*. Proyecto HOREX (2008 – 2011)
- Menéndez, E. (2010) *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ISBN: 978-84-89702-24-0 (Autorizado por Esperanza Menéndez, propietaria del @)

- Menéndez E., Aldea B. y Prendes, N. (2011): *Estado del conocimiento sobre la reacción árido-álcali y el ataque interno por sulfatos*, Proyecto HOREX
- Menéndez E., Prendes N., Márquez C. y Aldea, B. (2012): “Evaluations of granitic aggregates behavior in relation with the alkaline extraction and compositional change in their phases”, en *Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*, Austin-Texas (USA)
- Menéndez E. (2013): “Spanish experience with AAR & ISA”, *ICOLD Workshop on Dams with Alkali-Aggregate Reactions*, Southeaster (USA)
- Menéndez E. (2019): “Estrategia integral de prevención de la reacción árido-álcali”, *Monografía n° 430 del IETcc.*, Ed. CSIC
- Menéndez E., García-Roves R., Aldea B., Puerto E. y Recino, H. (2021): “Study of the alkali-silica reaction rate of Spanish aggregates. Proposal of a classification based in accelerated mortar bars tests and petrographic parameters”. *Materiales De Construcción*, 71(344), pp. 263. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.13421>
- Menéndez, E. (1992 – 2019): *Informes IETcc-CSIC*
- Nixon, P.J. y Sims, I. (2016): *RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures (STAR)*, Ed. Springer
- Segarra, J. (2005): *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón*, Tesina, Ed. Universidad Politécnica de Cataluña
- SEPREM (2013): *Inventario de presas*, Sociedad Española de Presas y Embalses, www.seprem.es
- SPANCOLD (2013): *Presas en España*, www.spancold.org
- UNE-EN 932-3:1997 (1997): *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 3: Procedimiento y terminología para la petrografía simplificada*, UNE
- UNE 83967:2016 (2016): *Durabilidad del hormigón. Método de ensayo para evaluación de la expansión potencial por reacción árido-álcali de dosificaciones de hormigón. Método semiacelerado de prismas de hormigón*, UNE
- UNE 83968:2016 (2016): *Durabilidad del hormigón. Evaluación de la expansión en probetas de mortero utilizando mezclas de áridos potencialmente reactivos y no reactivos, frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato. Método acelerado en probetas de mortero*, UNE
- UNE 83969:2016 (2016): *Evaluación de la expansión en probetas de mortero empleando conglomerantes y áridos potencialmente reactivos frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato*, UNE
- UNE 146508:2017 (2017): *Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero*, UNE

2. Mecanismos de deterioro

Los principales procesos de degradación del hormigón de presas asociados a reacciones expansivas en España están íntimamente relacionados con la naturaleza de los áridos empleados.

Generalmente las reacciones que se producen se clasifican en dos categorías principales, según el tipo de proceso que tiene lugar:

- Reacciones álcali-sílice (RAS)
- Ataque interno por sulfatos (AIS)

En este capítulo se exponen los principales mecanismos de deterioro de ambos tipos de procesos, y adicionalmente se indican los de otros tipos de reacciones expansivas menos relevantes o frecuentes para la casuística del deterioro en presas. También se definen las condiciones necesarias para que estos procesos se produzcan en mayor o menor extensión, así como los factores que pueden influir tanto en la velocidad como en la intensidad de las reacciones y en su diagnóstico. No obstante, hay que considerar que en numerosos casos la detección de compuestos característicos de estos procesos no lleva necesariamente asociado que ya se haya producido un proceso expansivo de magnitud suficiente como para generar daños en el hormigón de la presa.

2.1. Expansión vs daño por procesos expansivos (expansividad)

La *expansión* es un proceso asociado con algunas reacciones químicas en las que el volumen del producto formado por esa reacción es superior a la suma de los volúmenes de los reactivos originales. Los procesos expansivos son comunes en las primeras edades de hidratación de la pasta cementante, que van incrementando su volumen y densificándose en las primeras horas desde la fabricación del hormigón. Mientras que el volumen de los áridos permanece generalmente estable. Este proceso de hidratación de la pasta cementante prácticamente se paraliza antes de las primeras 24 horas de iniciada la reacción, si bien sigue evolucionando y densificándose en los días sucesivos.

Por su parte, *la expansividad o daño por expansión* en el hormigón se refiere a la formación de fisuras, generada como consecuencia de la formación de geles de reacción álcali-sílice o la cristalización de etringita, en cantidad suficiente para superar la resistencia a tracción del hormigón. Estas características del daño por expansión son similares en los diferentes procesos expansivos.

2.2. Reacción álcali-sílice

Algunos tipos de áridos que presentan compuestos de naturaleza silíceos inestables pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos disueltos en la estructura porosa generada durante la hidratación del cemento, y en las interfases entre el árido y la pasta. La fase acuosa de esa estructura de poros microscópicos contiene una disolución alcalina con un pH superior a 12,5; que corresponde al producto de solubilidad del hidróxido cálcico originado durante la hidratación de los silicatos y aluminatos cálcicos del cemento. Cuanto mayor es la cantidad de alcalinos solubles (sodio y potasio) aportados por el cemento, mayor es el pH de la disolución alcalina de la fase acuosa, en la que se puede producir la migración de estos iones por toda la red de poros interconectada.

De una forma simplificada se puede considerar que en las reacciones álcali-sílice se produce una reacción entre la disolución alcalina de los poros (hidróxidos alcalinos) y la sílice de los áridos reactivos, en presencia de agua.

Este proceso produce geles expansivos y causa fisuración en los áridos y en la pasta de cemento hidratado. Generalmente los efectos de este tipo de deterioro en las estructuras se manifiestan de forma bastante lenta, ya que existe un periodo latente durante el que la reacción tiene lugar en el hormigón sin que se manifiesten problemas estructurales o fallos de funcionamiento de la presa. La duración de este periodo latente puede prolongarse incluso más de 10 años, desde que se inicia la formación de los primeros geles (Gao, 2010).

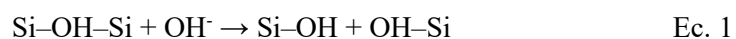
2.2.1. Descripción del mecanismo de deterioro de la reacción árido-álcali

Los antecedentes históricos sobre el proceso de la reacción entre los áridos silíceos y la disolución de alcalina, se remontan a los años 40, cuando se publicaron los primeros trabajos sobre esta materia en lo que a su problemática se refiere (Stanton, 1940). En una publicación anterior de SPANCOLD (Del Hoyo, 2008) se pasa revista a las sucesivas hipótesis y teorías que han ido estableciéndose desde entonces.

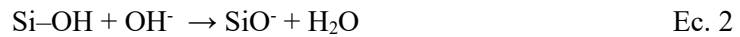
Si bien no se ha establecido completamente el mecanismo de reacción álcali-sílice, hay varias consideraciones generales consensuadas, en cuanto al proceso de la reacción.

La reacción química que ocasiona este proceso se lleva a cabo en varias etapas (Poole, 1992; ICOLD, 1991).

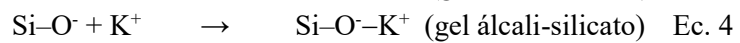
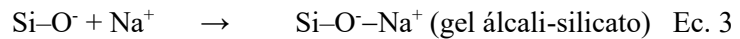
El mecanismo se inicia cuando la sílice reactiva, existente en el contorno o el interior del árido, queda expuesta en un medio con una disolución fuertemente alcalina (elevado pH). Los iones hidroxilo (OH^-) atacan los puentes siloxano (Si-O-Si) y se forma una red de sílice débilmente cristalina. De esta forma los puentes siloxano quedan reemplazados por grupos silanol:



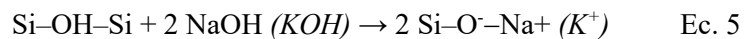
Los grupos silanol reaccionan con los iones hidroxilo de la disolución alcalina, obteniendo como producto Si-O^- :



Este anión Si-O^- tiene afinidad por los cationes alcalinos (Na^+ o K^+) para mantener su balance de cargas, lo que conduce a la formación del gel de silicato alcalino correspondiente a cada catión:



De forma resumida, la reacción sería:



Estos geles álcali-silicato presentan la capacidad de absorber agua, existente en la estructura de poros del hormigón e hincharse, dado que al hidratarse aumentan su volumen. El incremento de la presión interna generada por el hinchamiento puede llegar a generar la fisuración del hormigón, en cuyo caso se produce un aumento de la permeabilidad al agua, lo que a su vez favorece un mayor grado de hinchamiento y migración de los geles formados.

El proceso de expansión se manifiesta lentamente: inicialmente los geles van rellenando los poros y huecos, y cuando quedan colmatados aumenta la presión que ejercen los geles de silicato alcalino por la gradual imbibición de agua, hasta generar tensiones internas que lleguen a ser superiores a la resistencia a tracción del hormigón, ocasionando entonces la fisuración (Figura 2.1).

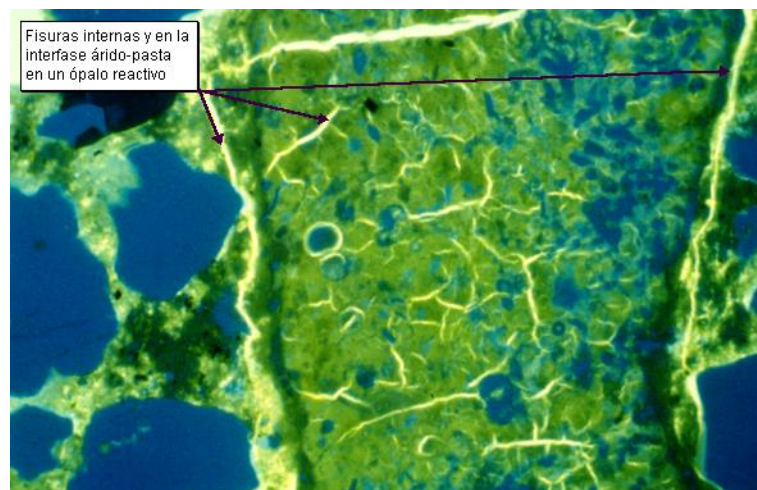


Figura 2.1. Fisuración por geles expansivos de RAS (Microscopía con luz fluorescente, 63x)
(Sprint RA-419, 1994)

La reacción álcali-sílice produce simultáneamente dos modalidades diferentes de hidratos de geles álcali-silicato (Helmuth, 1992): los formados por combinación con los hidróxidos de sodio o potasio, indicados en las ecuaciones anteriores, que presentan capacidad para absorber agua e hincharse, y los formados por estos mismos hidróxidos alcalinos, pero en combinación con Ca(OH)_2 , que no generan hinchamiento.

Los geles tienen una composición muy rica en silicio con algunos álcalis y calcio en su composición. Estos geles se observan en las primeras etapas de la reacción y, cuando esta se va desarrollando y abre nuevas zonas de reacción. Por su parte, los geles vítreos van metiéndose en los intersticios de pasta cementante cuando va avanzando la reacción, incluyendo iones de calcio en los productos de reacción por intercambio iónico calcio-sodio y calcio-potasio. Estos compuestos adquieren una estructura microcristalina, generalmente de cristales tipo roseta que son más estables y menos expansivos que los geles. Por otra parte, el intercambio iónico regenera los álcalis a la fase acuosa del hormigón, contribuyendo a formar nuevos núcleos de reacción (Menéndez 2010 y 2011; Katayama, 2012).

En las Figuras 2.2 y 2.3 se pueden observar geles vítreos y cristales tipo roseta.

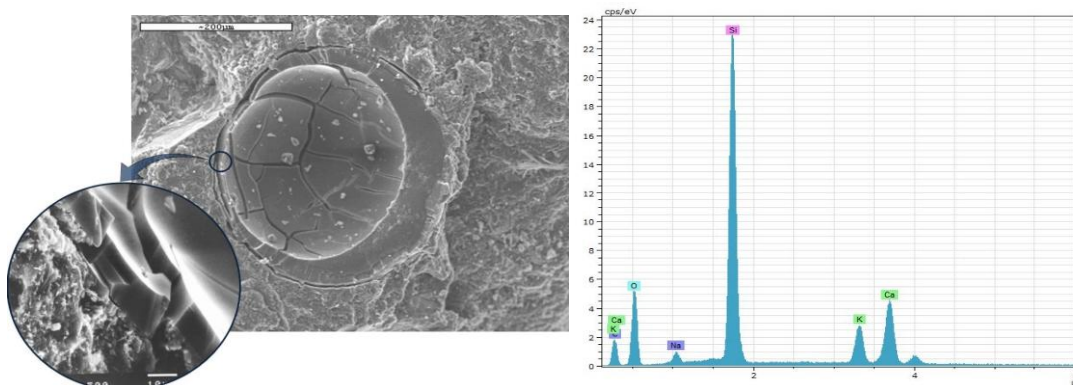


Figura 2.2. Geles vítreos en el interior de un poro, con una composición muy rica en silicio, potasio y sodio, y calcio, procedente de la pasta cementante (SEM-EDX) (Menéndez, 2010).

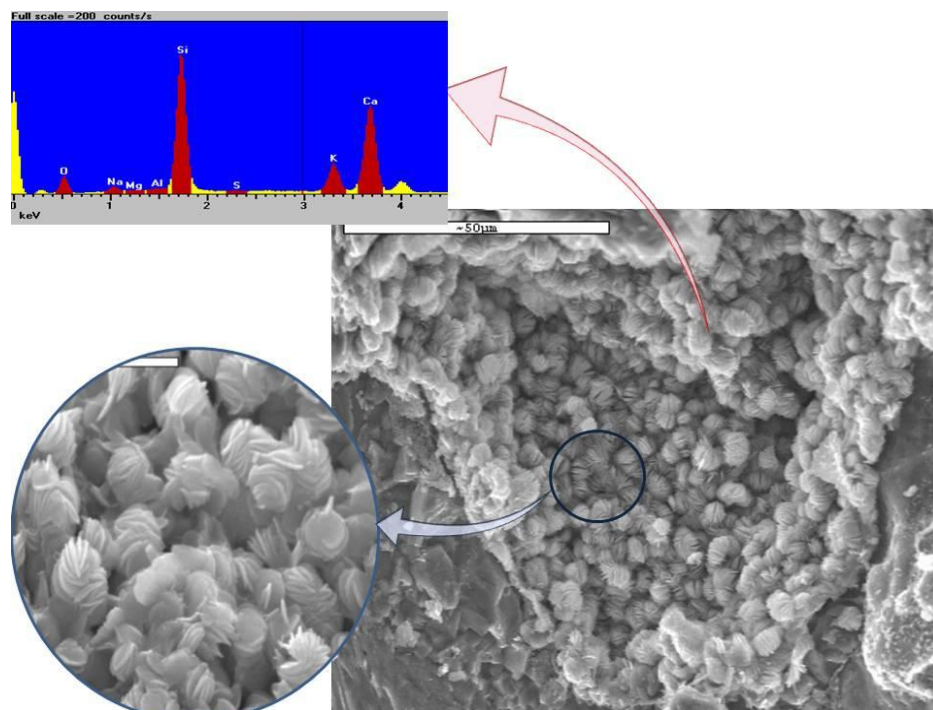


Figura 2.3. Geles vítreos en el interior de un poro, con una composición muy rica en silicio, potasio y sodio, y calcio, procedente de la pasta cementante (Menéndez, 2010).

Cuando en el hormigón se produce la reacción álcali-sílice, siempre se forma este segundo tipo de geles de silicatos cálcico-alcálicos hidratados, sin capacidad de hinchamiento, cuya existencia por sí misma no es indicativa de que pueda ocasionarse un comportamiento destructivo, pese a la formación de geles.

Únicamente se debe considerar que pueden existir daños asociados a la RAS cuando se detectan conjuntamente ambos tipos de geles, y este es el principal criterio de diagnóstico para confirmar la existencia de este tipo de deterioro.

Numerosos estudios experimentales han concluido en que una expansión acusada sólo ocurre cuando en el medio existe una cantidad de calcio disponible en forma de hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En sistemas con un contenido elevado de alcalinos y sílice reactiva, pero en ausencia de hidróxido cálcico, la sílice se disuelve, pero se mantiene en disolución. Aunque el papel que el calcio juega en la expansión del gel aún no ha sido consensuado, hay una serie de mecanismos propuestos a este respecto, indicados seguidamente (ACI 201):

- El calcio permite una reutilización de los alcalinos reemplazando los álcalis en los productos de reacción de modo que estos queden libres para el reinicio del proceso (Thomas, 2001; Hansen, 1944).
- El hidróxido cálcico genera una reserva de iones OH^- que permite que se mantenga una concentración elevada de OH^- en disolución (Wang, 1991).
- Las altas concentraciones de calcio disuelto en los poros inhiben la salida por difusión de la sílice fuera de las partículas de árido reactivas (Chatterji, 1979 y 1984).
- Si no hay calcio disponible, la sílice reactiva queda en la disolución de hidróxido alcalino sin causar expansión (Thomas, 1998; Diamond, 1989).
- La existencia de geles ricos en calcio resulta una condición necesaria para originar la expansión, ya sea directamente, formando parte de la reacción, o indirectamente, originando la formación de una membrana semipermeable alrededor de las partículas de árido reactivo (Thomas, 1991; Bleszynski, 1998).

Aunque el mecanismo sobre cómo participa el hidróxido cálcico en el proceso aún no esté debidamente consensuado, es obvio que juega un papel fundamental en el desarrollo del comportamiento expansivo asociado a la reacción. Por ello, la reducción de la disponibilidad del hidróxido cálcico en disolución es una herramienta fundamental para la mitigación del potencial deterioro. Por ejemplo, la incorporación de materiales puzolánicos activos en el hormigón que consuma el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disuelto en los poros ha de llevar asociado una reducción de la expansión ocasionada por RAS.

El inicio y avance del deterioro depende fundamentalmente de tres factores, que son esenciales para que se produzca el proceso: el grado de reactividad de los áridos, la existencia de una cantidad suficiente de álcalis, y el aporte de agua o elevada humedad. Cuando uno de estos parámetros desaparece o se agota se puede considerar que el proceso de avance de la RAS llega a su término.



Figura 2.4. Factores necesarios para el desarrollo de la reacción

2.2.1.1. Reactividad de los áridos

El grado de reactividad de los áridos depende de diversos factores. Este grado aumenta cuanto mayor es la proporción de sílice reactiva y el grado de solubilidad de la sílice en el medio alcalino. Este último parámetro aumenta cuanto más débil es la cristalinidad de la sílice y más pequeño el tamaño de grano (mayor superficie expuesta a la disolución alcalina), si bien algunos ensayos de laboratorio no corroboran esta teoría sobre el tamaño de partícula (Rajabipour, 2015). De igual modo, los áridos finos y los que presentan elevada porosidad accesible al agua son más susceptibles a la RAS que los áridos gruesos debido a su mayor contorno de superficie de partículas expuesto al medio alcalino. No obstante, para una misma tipología de árido, los áridos gruesos forman mayor cantidad de productos reactivos a largo plazo, generando localmente mayores tensiones y, por tanto, mayor deterioro (Poyet, 2007; Menéndez, 2010; Gadea, 2010).

Para explicar las diferencias del grado de reactividad entre unos y otros tipos de áridos silíceos se debe considerar que la reactividad de las partículas de árido depende de cómo esté constituida su estructura cristalina, ya que esto condiciona la proporción de sílice reactiva y el grado de solubilidad de la sílice en el medio alcalino (Islam, 2013).

Ambos parámetros están directamente relacionados con la estructura de la red cristalina de la sílice (Touma, 2001). Este compuesto está formado por tetraedros con el Si en el centro y O en los cuatro vértices (Figura 2.5). El encadenamiento de estos tetraedros por los vértices forma estructuras cristalinas muy estables desde el punto de vista químico y mecánico (Figura 2.6).

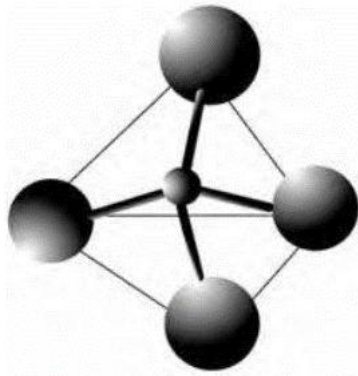


Figura 2.5. Estructura del SiO₂.

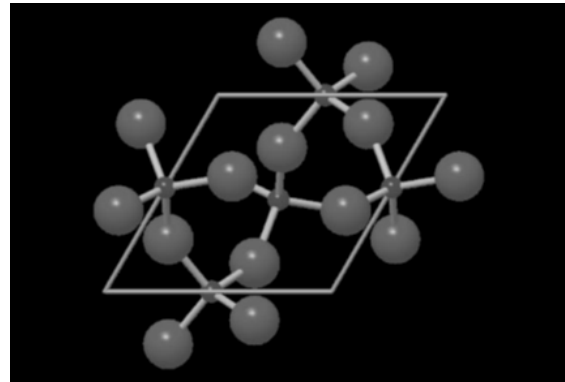


Figura 2.6. Estructura cristalina del cuarzo.

En un principio los minerales silíceos en los áridos se consideraban estables si eran cristalinos e inestables si eran amorfos, pero los sucesivos casos de RAS detectados demostraron que en esta hipótesis había muchas excepciones (Farny, 2007). Esto se debe a que la sílice presenta diversas formas cristalinas, como el cuarzo, la tridimita y la cristobalita. El cuarzo es siempre estable en medio alcalino, salvo que esté microfisurado o su estructura sea microcriptocristalina. La tridimita y la cristobalita son cristalinos, pero al tratarse de minerales porosos y de baja densidad, su estructura puede verse alterada en medio alcalino, por lo que son reactivos. En el primer caso, estos desórdenes de la red cristalina hacen que la microestructura resultante (criptocristalina) no sea estable y facilite la interacción con los hidróxidos alcalinos, al igual que las estructuras que contienen sílice amorfa, que presentan oquedades y poros en la red en los que el balance de cargas eléctricas no está equilibrado (Figura 2.7). Este tipo de estructuras son reactivas en contacto con la disolución alcalina, dando lugar a la formación de los geles expansivos típicos de este proceso.

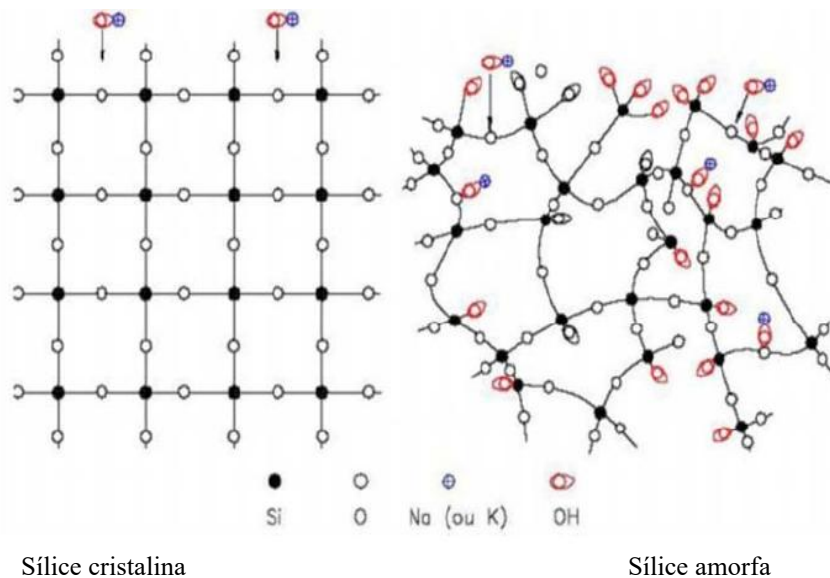


Figura 2.7. Avance de la reacción con los hidróxidos alcalinos según la cristalinidad de la sílice (Dent Glasser, 1981)

En resumen, en la naturaleza existen numerosos tipos de rocas silíceas (o que contienen minerales silíceos) que son susceptibles de RAS, y que se caracterizan porque: a) la red cristalina del cuarzo presenta defectos y alteraciones, b) su microestructura es débilmente cristalina, c) es parcialmente amorfa, d) es vítrea, o e) es microporosa.

En la Tabla 2.1 se presenta una clasificación de rocas y minerales reactivos susceptibles a la RAS. En el Capítulo 3 se exponen los métodos de evaluación para la detección de minerales reactivos.

Tabla 2.1. Principales rocas y minerales constitutivos reactivos con los álcalis (Código Estructural, 2021)

Rocas		Minerales sensibles en medio alcalino
Magmáticas	- Granitos - Granodioritas	Cuarzo con red deformada presentando una extinción ondulante. Minerales feldespáticos alterados, uniones de partículas abiertas. Presencia de cuarzo micro-criptocristalino
	- Riolitas - Dacitas - Andesitas - Traquita - Basaltos	Presencia de vidrios síliceos o vidrios basálticos más o menos desvitrificados, presencia de tridimita, cristobalita y ópalo.
	- Obsidiana - Tufos volcánicos - Retinitas	Vidrios ricos en sílice más o menos desvitrificados y frecuentemente figurados.
Metamórficas	- Gneis - Esquistos micáceos	Cuarzo con extinción ondulatoria. Presencia de cuarzo micro-criptocristalino de segunda generación, uniones de partículas abiertas, minerales feldespáticos y micáceos alterados.
	- Cuarzitas - Corneanas	Cuarzos asociados a un cemento cuarzoso y opalino. Presencia de cuarzo micro-criptocristalino de segunda generación. Presencia de filosilicatos. Presencia de cuarzo con extinción ondulatoria o de cuarzo microfisurado.
Sedimentarias	- Arenisca - Cuarzitas	Cemento síliceo mal cristalizado, uniones de partículas alargadas. Presencia de cuarzo micro-criptocristalino
	- Grauvacas	Minerales filíticos asociados.
	- Limolita	Presencia de ópalo de cuarzo microcristalizado.
	- Sílex	Presencia de calcedonia, ópalo.
	- Calizas - Calizas dolomíticas - Dolomías	Presencia de sílice de tipo ópalo en micronódulos o distribuidas en red, asociada o no con sulfuros sedimentarios y filitas.

Este listado del Código Estructural (MITMA, 2021) puede dar una idea del tipo de minerales y rocas potencialmente reactivas, si bien hay otras muchas que pueden ser reactivas, en función de las condiciones ambientales a las que esté sometido el hormigón. Adicionalmente en los comentarios se recogen diversas cuestiones sobre áridos de naturaleza mixta, permiten clarificar determinados comportamientos en los ensayos.

2.2.1.2. Contenido de alcalinos

Los hidróxidos alcalinos en disolución acuosa presentan afinidad química con las fases reactivas de la sílice. Si la reactividad del árido es muy elevada, los geles expansivos pueden formarse incluso con bajas concentraciones de alcalinos en la red porosa. Este es el motivo por el que no se puede considerar que únicamente el empleo de cementos bajos en álcalis sea una medida suficientemente segura por sí sola para la prevención y control de la RAS, si bien por ejemplo en EE. UU. y en otros países se recomienda el empleo de cementos bajos en

álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,60$) según ASTM C150, como parámetro de control para minimizar la RAS. El contenido de alcalinos en el cemento (solubles en ácido) se expresa como Na_2O equivalente y corresponde a la suma del contenido de Na_2O más 0,658 veces el contenido de K_2O (transformación del K_2O en Na_2O , mediante su fracción molar), el contenido de Na_2O y de K_2O se puede determinar según las normas UNE-EN 196-2 o ASTM C114.

El contenido de Na_2O equivalente en los cementos portland CEM I (sin adiciones) es bastante variable, aunque en general está comprendido en el intervalo situado entre el 0,4 % y el 1,2 %. Estos alcalinos, al asociarse con la concentración de iones hidroxilo tras la hidratación del cemento portland, ocasionan que el pH de la red de poros sea superior a 13. Hay numerosas publicaciones que acreditan que cuanto mayor es el contenido de alcalinos del cemento, mayor es el incremento de la expansión inducida por la RAS, e incluso que cuando las concentraciones de alcalinos en la red porosa son muy elevadas, determinadas estructuras cristalinas de la sílice que habitualmente son consideradas como estables pueden ser atacadas y conducir a la formación de geles expansivos.

Por todo lo anterior, una de las estrategias de prevención de la RAS se basa en la limitación del contenido de alcalinos en el hormigón, en función de la mayor o menor reactividad de los áridos, aspecto que se trata en el apartado nº 3. En general se admite que para áridos muy reactivos es recomendable limitar del contenido de álcalis por debajo de $1,8 \text{ kg/m}^3$, que se amplía hasta $3,0 \text{ kg/m}^3$ para áridos poco reactivos (Macdonald, 2012).

Para cuantificar el contenido de alcalinos en la red de poros se deberían considerar todos aquellos álcalis potencialmente solubles que sean aportados por los materiales componentes del hormigón, no solo por el cemento, aunque como la cantidad incorporada por el resto de materiales suele suponer una reducida contribución ponderal, en muchos casos suele ser despreciada, como ocurre en la normativa canadiense en la que no se tienen en cuenta los alcalinos que puedan aportar las adiciones al hormigón utilizadas para mitigar la RAS. Con este criterio el contenido de alcalinos en el hormigón se calcula como:

$$\begin{array}{l} \text{Contenido de} \\ \text{cemento en el} \\ \text{hormigón} \\ \text{(kg/m}^3\text{)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Contenido de Na}_2\text{O} \\ \text{eq}^{(*)} \text{ en el cemento} \\ \text{(\%)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Contenido de álcalis} \\ \text{solubles en el} \\ \text{hormigón} \\ \text{(kg/m}^3\text{)} \end{array} \quad \text{Ec. 6}$$

En otros países sí se tienen en cuenta los alcalinos que puedan aportar las adiciones. Algunos autores (Hobbs, 1988) han propuesto que la mitad del contenido de Na_2O equivalente de las escorias y 1/6 del de las cenizas volantes se incluyan como sumandos en la Ecuación 6 para calcular el contenido de álcalis solubles en el hormigón. También se debe considerar que determinados tipos de áridos pueden incrementar el contenido de álcalis solubles de la red de poros, como los áridos de procedencia marina y algunos granitos, feldespatos, micas y minerales vítreos, si bien su contribución de alcalinos no suele alcanzar la décima parte de lo que aporta el cemento portland ni aún en las situaciones más desfavorables.

Un aspecto muy relevante con respecto al deterioro por RAS asociado al contenido de alcalinos está asociado a la migración que estos y a la potencial concentración preferencial de álcalis en determinadas zonas del hormigón (Thomas, 2006). Aunque en general se considera

que la concentración de álcalis en la red porosa es uniforme, cuando el hormigón está expuesto a reiterados ciclos de humedad y secado se pueden crear zonas en la que se produce una alta concentración de álcalis. Esto se debe a que, durante el secado, el gradiente de humedad existente desde el interior hacia la superficie exterior del hormigón moviliza los iones hacia esa zona en la que se produce la evaporación (Stark, 1991).

Este proceso de migración de álcalis puede generar concentraciones elevadas en zonas adyacentes a las superficies exteriores en las que se produce la evaporación, generando situaciones de riesgo de RAS en hormigones en los que inicialmente la concentración de álcalis en la estructura porosa es reducida o moderada. Lógicamente en estos casos la formación de geles y el deterioro subsiguiente se intensifica en esa capa de hormigón superficial susceptible al aumento de la concentración de álcalis por la evaporación.

Otro aspecto que se debe considerar en función del tipo de exposición al que vaya a estar sometido el hormigón es el potencial aporte de álcalis externos. En general, en paramentos de hormigón compactos y sin fisuración, esta contribución de alcalinos suele resultar despreciable, pero cuando el hormigón es muy permeable o está fisurado superficialmente, pueden incidir muy negativamente en la magnitud y extensión del proceso de deterioro. Esto se circunscribe básicamente a superficies de hormigón que puedan estar en contacto con aguas salobres o aguas de escorrentía que contengan sales de deshielo (a base de cloruro sódico, para uso como anticongelante en calzadas sobre la presa).

2.2.1.3. Efecto del agua y la humedad

Como se ha indicado anteriormente los geles presentan capacidad para absorber agua existente en la estructura de poros del hormigón e hincharse, dado que al hidratarse aumentan su volumen. El incremento de la presión interna generada por la gradual imbibición de agua puede generar tensiones internas que lleguen a ser superiores a la resistencia a tracción del hormigón, ocasionando entonces la fisuración.

Por tanto, hormigones que contengan áridos muy reactivos y un contenido alto de alcalinos van a manifestar muy poca o nula expansión si se mantienen continuamente en una exposición seca. Se considera que con humedades inferiores al 70 % la capacidad de imbibición de agua e hinchamiento de los geles es muy reducida, y generalmente no van a llegar a producirse expansiones significativas ni ocasionar daños. Los ambientes por encima del 80 % de humedad relativa sí que favorecen el hinchamiento de los geles y el comportamiento expansivo del material, que se manifiesta en mayor extensión cuando el hormigón está saturado o expuesto a ciclos de humedad y secado. Por este motivo sobre los paramentos exteriores de hormigón con áridos reactivos expuestos al agua y la alta humedad se puede recomendar la aplicación de láminas o películas orgánicas impermeables, impregnaciones hidrófugas o revestimientos cementosos de muy baja permeabilidad para minimizar el inicio y avance de la RAS, aunque obviamente para la casuística de las presas es un tipo de intervención que difícilmente tiene eficacia y cabida.

2.2.2. Reacción silicato-álcali vs reacción álcali-sílice

Hasta hace aproximadamente una década se suponía que el mecanismo de la reacción era diferente en función del grado de cristalización de la sílice, de modo que existía un mecanismo de reacción para las rocas con minerales silíceos cristalizados y otro para las rocas con estructura más desordenada. Según este criterio se distinguían procesos por reacción álcali-silicato y reacción álcali-sílice. En la reacción álcali-silicato se produce una reacción entre los silicatos alterados que constituyen algunas rocas (como los feldespatos y con los minerales de las intercapas de los filosilicatos) y la disolución alcalina. Mientras que la reacción álcali-sílice se produce en áridos constituidos solo por material expansivo. Debido a esta razón se consideraba que la reacción álcali-sílice se produce de forma más rápida, pero esto varía en función de distintos parámetros ambientales, como la temperatura, la humedad, el viento, etc. y también de las cargas mecánicas, a que esté sometido el hormigón localmente (Hoobs, 1988, Martín, 2018).

Segarra, 2007, realizó estudios en los que se evidenciaban diferencias en las cinéticas de reacción en función de que el proceso expansivo haya sido ocasionado por minerales cristalinos o amorfos. En la Figura 2.8. se representa el tiempo que ha sido necesario para que se manifiesten daños en función de la altura de la presa. Conforme a estos datos se requiere una media de 18 años para que produzcan daños evidentes por RAS en presas de gravedad con alturas hasta 45 m, o hasta los 27 años en presas bóveda, cuando se utilizan áridos con minerales directamente reactivos. Mientras que, en el caso de RAS, cuando se utilizan rocas que contienen partículas reactivas, los tiempos para la manifestación de daños evidentes aumentan hasta una media de 45 años en presas de gravedad, y hasta los 35,5 años en presas bóveda.

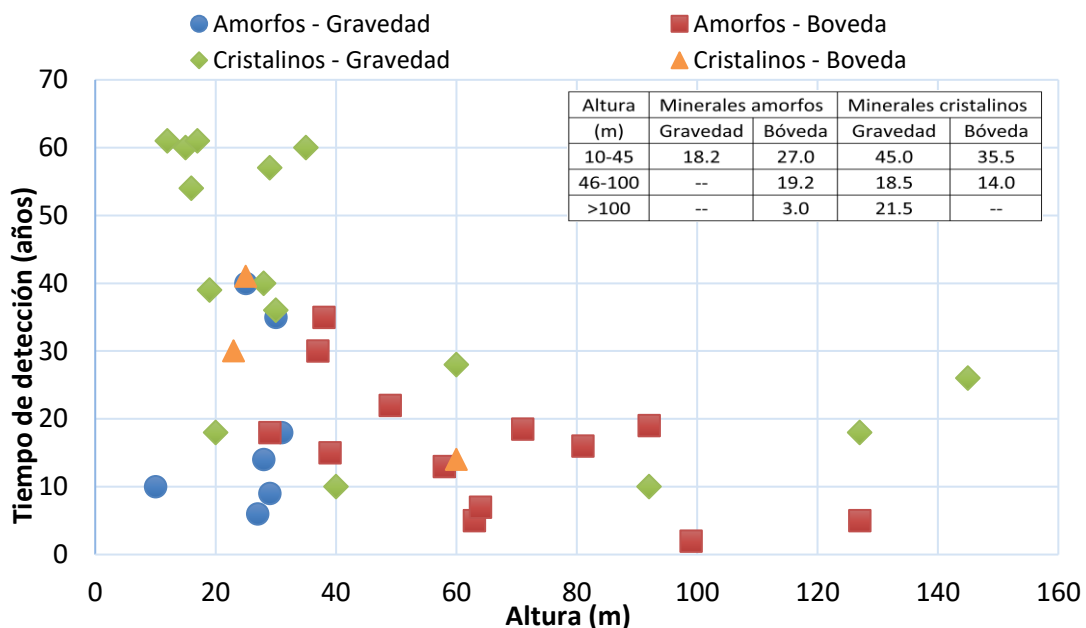


Figura 2.8. Tiempo de detección de RAS en presas con áridos con minerales amorfos y cristalinos, para distintas tipologías de presas (cortesía J. Rodríguez, basado en Segarra, 2005)

Sin embargo, actualmente se ha consensado en la comunidad científica que la reacción es la misma, aunque la cinética del proceso es más rápida cuanto mayor es la proporción de sílice amorfa, con relación al porcentaje de partículas reactivas en los áridos. En un estudio realizado

sobre 68 áridos españoles (Menéndez, 2021) se clasifica la reactividad de los áridos como no reactiva, reacción lenta, reacción moderada y reacción rápida, en base al análisis petrográfico, con determinación del índice de reactividad de los cuarzos (I_{QR}) (Prendes, 2007; Menéndez, 2015), y la expansión de barras de mortero (UNE 146508), extendida en el tiempo. Incluso pueden detectarse áridos con efecto pésimo, mediante estos ensayos. El efecto pésimo hace referencia a la cantidad de un determinado árido reactivo que es necesario para producir la máxima expansión y que, generalmente, no coincide con la mayor cantidad de árido reactivo. Esto se debe a que, en el caso de alta concentración de áridos reactivos, estos consumen rápidamente los alcalinos, atenuando más rápidamente la reacción.

2.2.3. Reacción carbonato-álcali

La reacción carbonato-álcali es aquella que se produce entre áridos de naturaleza dolomítica y los álcalis presentes en la fase porosa del hormigón. Esta reacción produce la desdolomitización del carbonato cálcico-magnésico, formando brucita $Mg(OH)_2$ y recirculando los álcalis a la fase porosa del hormigón (Taylor, 1998). Este tipo de reacción se relacionaba con la reacción árido-álcali, ya que para que se produzca es necesaria la presencia de álcalis. No obstante, cada vez es más cuestionada en los procesos expansivos de las presas y otras estructuras (Villeneuve, 2012). En muchos casos se ha corroborado que las presas que se consideraban alteradas por la reacción carbonato-álcali estaban relacionadas con la inclusión de partículas con sílice reactiva en las dolomitas (Menéndez, 2013).

2.3. Reacción por ataque interno de sulfatos

Los sulfatos presentes en el hormigón, procedentes del yeso añadido al cemento como regulador de fraguado, reaccionan generalmente durante las primeras etapas de la hidratación formando compuestos estables no expansivos. No obstante, sulfatos de origen diferente pueden reaccionar en presencia de agua, cuando el hormigón está completamente endurecido, formando compuestos expansivos que pueden inducir la formación de fisuras y la degradación del hormigón. Esto hace que sea necesario limitar la cantidad de sulfatos que aportan los materiales constituyentes del hormigón y, por tanto, de los áridos. El azufre, procedente de los áridos, puede proceder de sulfatos, principalmente sulfatos cálcicos o sulfatos alcalinos, y de sulfuros. En este segundo caso los compuestos más potencialmente dañinos son las pirrotinas. Estos últimos son sulfuros de hierro oxidables que pueden descomponerse, en presencia de oxígeno, liberando iones sulfatos que reaccionan con los aluminatos y el calcio presentes para formar compuestos expansivos.

2.3.1. Tipos de reacciones asociadas a la presencia de sulfatos en el hormigón

En un estudio (Chinchón-Payá, 2012) realizado para evaluar el comportamiento de la piritita y la pirrotina (bajo las mismas condiciones) y determinar la influencia de la roca encajante en la velocidad y naturaleza de los productos alterados mediante la adición de áridos silíceos y

áridos con calcita en disoluciones con sulfuros de hierro. Para ello, los autores emplearon áridos procedentes de la zona de extracción para la construcción de una presa en el Pirineo Catalán que posteriormente presentaron degradación (Ayora, 1998).



Figura 2.9. Sacos con los áridos con potencial degradación (cortesía A. Aguado)

Tras la caracterización de los áridos, se seleccionaron aquellos con un contenido de azufre insignificante, garantizando así que la formación de sulfatos en el proceso de oxidación de la mezcla de sulfuros con los áridos se debe a la oxidación de la pirita y la pirrotina exclusivamente. Tras comprobar la reactividad potencial de los sulfuros de hierro oxidables, los autores pudieron confirmar que la pirita y pirrotina se oxidan en presencia de agua generando hierros y sulfatos. Si bien, la pirrotina proporciona al medio un contenido de Fe^{2+} y SO_4^{2-} más elevado que la pirita.

Con respecto a la influencia de la roca encajante (marga, calcita o esquisto), los autores identificaron un incremento del pH (Figura 2.10 b, c y d) en comparación con la evolución de la disolución de los sulfuros únicamente (Figura 2.10 a). La presencia de carbonatos en la disolución con marga y calcita produce un efecto tampón, mientras en la disolución con esquisto el pH viene definido por la disolución de feldespatos y micas.

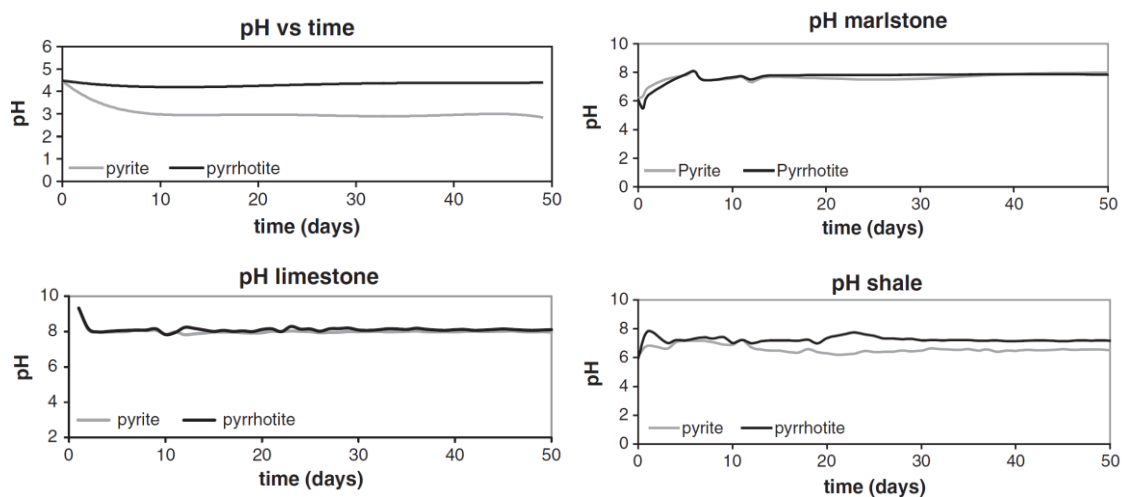


Figura 2.10. Evolución del pH: a) durante la oxidación de la pirita y pirrotina; y en la disolución de ambas con b) marga c) calcita y d) esquisto (Chinchón-Payá et al. 2012).

La relevancia de los resultados se pone de manifiesto al analizar las diversas normas relativas al uso de áridos en hormigón: Código Estructural (MITMA 2021), UNE-EN 12620:2002+A1:2008 (UNE, 2008) y ASTM C294-19 (ASTM, 2019). Todas ellas prohíben el uso de áridos que contienen sulfuros oxidables, si bien algunos autores indican que existen matices entre el tipo de que se trate (Chinchón-Payá, 2013).

La norma europea UNE-EN 12620 identifica la pirrotina como el sulfuro más perjudicial para la integridad del hormigón y limita el contenido total de azufre al 0,1% en los casos en los que se detecte dicho sulfuro en áridos para hormigón. Sin embargo, la normativa ASTM C294 no diferencia entre los minerales que aporten los sulfuros.

En ningún caso las normas mencionan ni el estado de meteorización y degradación previo de los sulfuros antes de ser incluidos en el hormigón ni el tipo de roca en la que se hallan los sulfuros de hierro.

Algunos autores (Chinchón-Payá, 2012) sugieren que la EHE-08 no refleja de forma clara qué mineral se degrada a mayor velocidad (la pirrotina) y, en consecuencia, pudiendo comprometer de forma más grave la integridad del hormigón. Asimismo, los autores valoran la limitación por parte de la EHE-08 y la UNE-EN 12620 del contenido de azufre inferior a 0,1% como muy restrictiva; resultando en el rechazo algunos tipos de áridos que podrían ser válidos para uso en hormigón.

Con relación al estudio sobre la influencia de roca encajante, la evolución del pH de la disolución y la cantidad de productos de la alteración son comparables para los tres tipos de roca estudiados. Estos resultados confirman que no es necesario mencionar el tipo de roca encajante en las normativas de caracterización de áridos para su uso en hormigón.

2.3.2. Descripción del mecanismo de deterioro debido a ataque interno por sulfatos

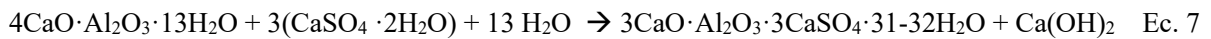
Los sulfatos pueden estar en los áridos como inclusiones de yeso, o combinados con álcalis (sulfatos sódicos y potásicos), si bien su presencia no es muy habitual. Por su parte, en las escorias de horno alto los sulfatos están principalmente encapsulados en los granos de escoria y, por tanto, no se combinan durante el proceso de hidratación. Debido a esto se puede aceptar un contenido mayor de sulfatos en las escorias que en el resto de áridos. Sin embargo, hay que tener en cuenta la posibilidad de la presencia de sulfuros que, al oxidarse, generarían sulfatos.

Los compuestos expansivos formados como consecuencia de la reacción de los sulfatos en el hormigón son principalmente la etringita y el yeso secundario. La etringita es una sal doble de trisulfo-aluminato-cálcico hidratado ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{-}32\text{H}_2\text{O}$), que se forma principalmente en presencia de agua por la reacción entre los aluminatos cálcicos, procedentes del cemento y los sulfatos; si bien también se puede formar a partir de la reacción del monosulfoaluminato-cálcico hidratado por combinación con iones sulfatos. Así mismo, el yeso secundario se forma como consecuencia de la reacción de iones sulfatos con iones calcio en presencia de agua, para formar yeso, que cristaliza en el material endurecido con un

aumento de volumen asociado. Además de estas reacciones principales se pueden producir reacciones secundarias, debido a la presencia de iones asociados con los sulfatos, como puede ser el magnesio o los alcalinos (sodio y potasio).

2.3.2.1. Reacción de formación de etringita

La etringita es el principal compuesto de reacción formado en el ataque interno por sulfatos y puede tener efectos expansivos o no dependiendo del momento y las condiciones en que se forme. Su composición tiene un elevado contenido en agua, por lo que la presencia de esta es esencial para que se forme la etringita. La reacción básica de la formación de etringita durante el proceso de hidratación se recoge en la siguiente ecuación, si bien los sulfatos pueden estar combinados con otros iones, como se ha indicado anteriormente.

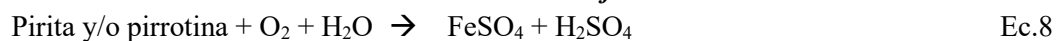


Estas reacciones, si bien son secundarias, pueden producir efectos no deseados en el hormigón como puede ser reacción árido-álcali, pérdida de cohesión de la pasta por intercambio iónico calcio-magnesio, entre otras. Además de la posible formación de compuestos expansivos, la presencia de sulfatos con sus cationes asociados puede hacer que aparezcan eflorescencias en las superficies del hormigón o del mortero (Taylor, 1997; Menéndez, 2010).

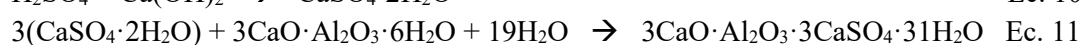
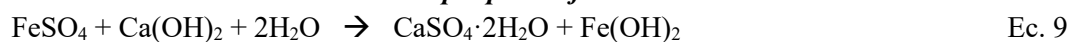
2.3.2.2. Reacción de oxidación de áridos de tipo pirita

En cuanto al mecanismo de formación de etringita, a partir de óxidos de hierro (piritas, pirrotina, marcasita o calcopirita) se oxidan en presencia de oxígeno gracias a las condiciones alcalinas del hormigón, produciendo hidróxidos de hierro y ácido sulfúrico. El sulfato ferroso y el ácido sulfúrico reaccionan con los constituyentes alcalinos de la disolución de los poros del hormigón para formar sulfatos alcalinos y sulfatos cálcicos, además de hidróxido férrico. Este proceso lleva asociado un proceso expansivo. En resumen, las reacciones de formación de etringita, a partir de óxidos de hierro son las siguientes (Taylor, 1997; Menéndez, 2010):

Oxidación de los sulfuros



Ataque por sulfatos



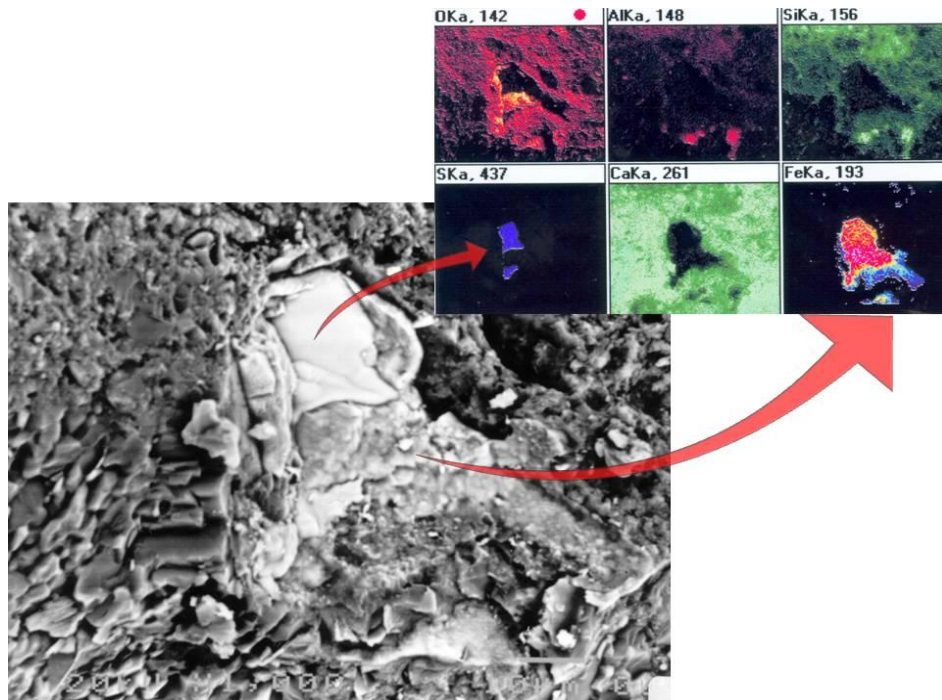


Figura 2.11. Inclusión de pirita en árido calizo con parte sin degradar (rica en azufre y hierro) y parte donde ha desaparecido el sulfato que ha migrado a la pasta cementante y solo permanece el hidróxido de hierro (Menéndez, 2010).

2.3.3. Formación de etringita por la presencia de sulfatos en el hormigón

La etringita es el principal producto formado como consecuencia de la interacción de los sulfatos con los componentes de la pasta, independientemente del origen de estos sulfatos. También se pueden formar otros productos, asociados con los sulfatos como el yeso secundario, sal de Friedel (en presencia de cloruros), sales sulfáticas, etc. En cuanto a su formación, la etringita mantiene la estequiometría de su reacción, al contrario de lo que sucede en la reacción álcali-sílice en la que la composición de los productos de reacción que pueden variar dependiendo de su localización o de la evolución en el hormigón. En la reacción álcali-sílice, la falta de formación de productos estequiométricamente estables, hace que, con la evolución de los productos de reacción, se puedan producir intercambios iónicos en los productos de reacción árido-álcali, generalmente con el calcio, para formar productos microcristalinos.

2.3.3.1. Expansión y expansividad en el hormigón (daño) debido a la formación de etringita

Como es sabido, el hormigón es un material que evoluciona con el tiempo, con una rápida evolución en las primeras horas y días desde su fabricación, y modificándose muy lentamente a partir de varias semanas de su puesta en obra. La formación de etringita se puede producir en diferentes momentos de la evolución del hormigón, desde los primeros momentos de hidratación, hasta formarse con el hormigón endurecido. Durante la fase de hidratación inicial del cemento se forma etringita, debida a la interacción entre los sulfatos, añadidos al cemento como regulador de fraguado, para evitar el bloqueo de la pasta cementante debido al alto calor de hidratación y rápido fraguado de los aluminatos cálcicos. Esta etringita es la denominada

etringita primaria y no genera expansividad, ya que se forma cuando el hormigón está en estado plástico y contribuye a la formación de productos que confieren resistencia al hormigón. El resto de tipos de etringita que se forman en el hormigón son secundarias y, generalmente, se denominan con el nombre del proceso de reacción que se produce (etringita diferida, ataque interno por sulfatos, ataque externo por sulfatos, etc.), todas ellas son secundarias, ya que se forman con el hormigón ya endurecido y pueden dar lugar o no a expansión. El que sean expansivas o no depende del proceso, de la cantidad de sulfatos, de las características locales del hormigón y de otros factores que hay que analizar en cada caso, preferentemente por técnicas de microscopía electrónica (Taylor, 1997; Menéndez, 2010).

Como se ha indicado anteriormente, la etringita se puede formar en distintas condiciones del hormigón:

- Hormigón fresco: La etringita formada *no produce expansividad*, ya que se forma con el hormigón en estado plástico y constituye un producto más de la hidratación de los cementos. Prácticamente la totalidad de los productos de hidratación del cemento son expansivos (tienen un mayor volumen final en el producto formado que la suma de volúmenes de los compuestos iniciales). El tapizado de la superficie de poros de aire con etringita, sin llegar a colmatarlos totalmente, está relacionado con la formación de etringita primaria. Desafortunadamente, técnicos poco especializados en este tema, asumen su presencia como un síntoma de ataque por sulfatos.
- Hormigón con alta temperatura de curado: Cuando el hormigón se cura por encima de 65 °C se inhibe la formación de etringita primaria, quedando sulfatos inestables en la fase porosa y en la pasta cementante. Adicionalmente, el aumento de temperatura hincha el hormigón, incluidos los áridos; y, cuando las piezas de hormigón se enfrían, se produce una contracción de los componentes generando huecos en las interfases árido-pasta y en la pasta cementante. Con el tiempo los sulfatos se estabilizan formándose etringita principalmente en los huecos formados en las interfases árido-pasta, de la pasta cementante y en los poros de aire, sin ocasionar expansividad, ya que cristaliza en huecos previamente existentes. Esta etringita llamada *diferida*, por su formación demorada en el tiempo, *no genera expansividad*. No obstante, esto depende de varios factores como: el coeficiente de dilatación de los áridos, la porosidad del hormigón endurecido, la temperatura de curado inicial, la cantidad de aluminatos cálcicos anhidros, la cantidad de agua y el tipo de iones presentes en la fase porosa y otros factores físico-químicos del hormigón. La alta temperatura durante el curado del hormigón puede ser debida a diversas situaciones: Alta dosificación de cemento, cementos con elevado calor de hidratación, tiempo muy caluroso, curado con vapor a alta temperatura y cualquier otra causa que genere calor durante las primeras horas de puesta en obra del hormigón.
- Hormigones endurecidos: Si se produce un aporte externo o interno de sulfatos al hormigón, cuando este ya está endurecido, se producirá local o generalizadamente la formación de etringita u otros productos sulfáticos expansivos. Estos productos neoformados *generalmente suelen producir daños por expansión*. La extensión y grado del daño producido dependerá de la porosidad, movilidad iónica de los sulfatos en la fase

- líquida, remanentes de aluminatos cálcicos anhidros y otros factores físico-químicos del hormigón. También podrían no producirse daños por formación de fisuras si el hormigón tiene suficientes huecos o poros de aire, como para que actúen como cámaras de expansión, o si el hormigón es tan compacto o está tan comprimido que no permite la movilidad iónica. En este último caso, el fenómeno de formación de etringita secundaria podría desencadenarse al reducir o quitar la compresión.

A continuación, en la Tabla 2.2 se recoge los principales procesos de formación de etringita, si se produce expansión y/o daño por expansión y las principales características de los procesos.

Tabla 2.2. Principales procesos de formación de etringita en el hormigón (Scrivener, 1999; Menéndez, 2010).

Proceso	Denominación de la etringita	Expansión/Daño	Observaciones
Hidratación	Primaria	<u><i>Sí/No</i></u>	<ul style="list-style-type: none"> • Se produce incremento de volumen, pero no hay expansión debido al estado plástico del hormigón. • La mezclada con productos de hidratación no se distingue del gel C-S-H. • Se observan cristales tapizando el interior de poros de aire, sin rellenarlos totalmente. • No hay aporte externo de sulfatos.
Etringita diferida	Secundaria diferida o diferida	<u><i>Sí</i></u> / Generalmente <u><i>no</i></u>	<ul style="list-style-type: none"> • Se inhibe la formación de etringita primaria, por alta temperatura durante la hidratación (grandes volúmenes, alto calor de hidratación del cemento, curado con temperatura, etc.) • Con el tiempo los sulfatos se combinan con los aluminatos rellenando huecos ya existentes, formados por el curado con temperatura inicial elevada (huecos, poros, interfases árido-pasta, etc.) • No hay aporte externo de sulfatos
Ataque interno por sulfatos	Secundaria	<u><i>Sí</i></u> / Generalmente <u><i>sí</i></u>	<ul style="list-style-type: none"> • Hay migración de sulfatos a la pasta por la oxidación de las piritas o pirrotinas. • Cristalizan en las interfases árido-pasta primero y después en los poros de aire (rellenándolos completamente) y en el interior de la pasta. • Forman fisuras cristalizando en su interior. • Hay aporte externo de sulfatos.
Ataque externo por sulfatos	Secundaria	Generalmente <u><i>sí</i></u> , también forman otros productos, como el yeso secundario / Generalmente <u><i>sí</i></u>	<ul style="list-style-type: none"> • Hay un frente de sulfatos desde el exterior a través de las superficies de exposición. • Cristalizan en huecos, poros, interfases árido-pasta y en el interior de la pasta. • Forman fisuras y cristalizan en su interior. • El agua de mar y otras sales de sulfatos pertenecen a este proceso. • Hay aporte externo de sulfatos.

A continuación, se muestran diferentes imágenes (Figuras de la 2.12 a 2.18), tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y de electrones retrodispersados (BSE), combinadas con microanálisis por energías dispersivas de rayos X (EDS).

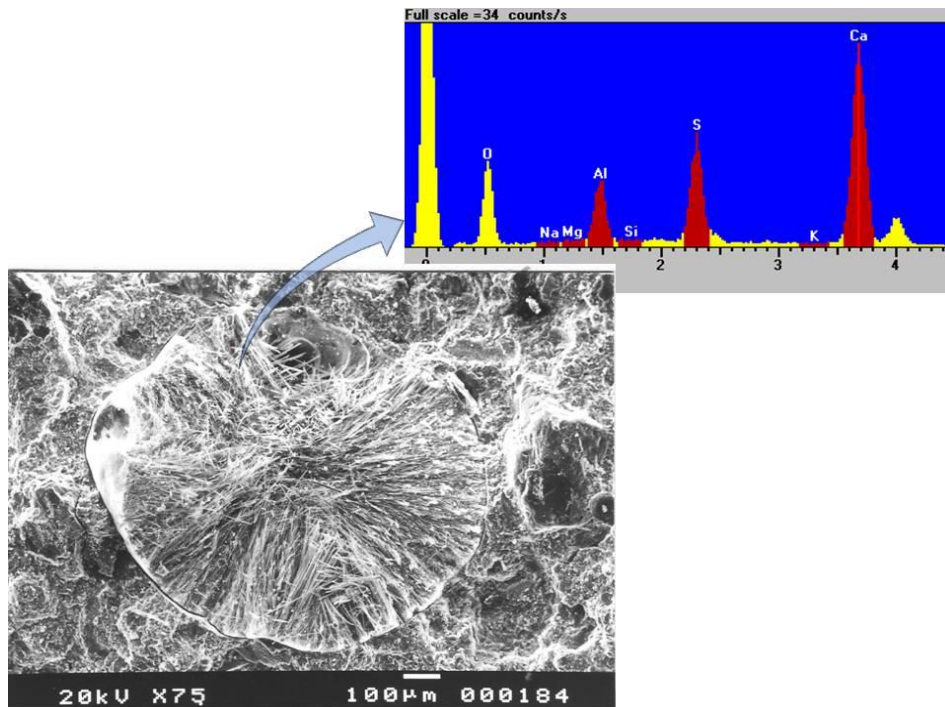


Figura 2.12. Etringita secundaria relleno casi completamente un poro de aire, posiblemente no expansiva (SEM-EDX) (Menéndez, 2010).

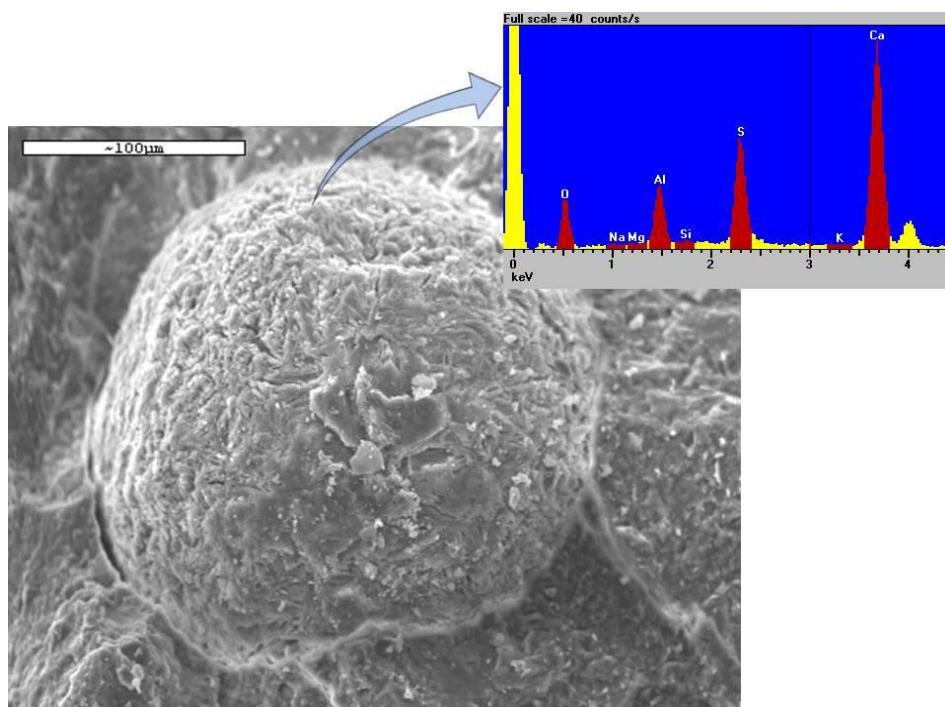


Figura 2.13. Etringita secundaria muy densificada relleno completamente un poro de aire, posiblemente expansiva (SEM-EDX) (Menéndez, 2010).

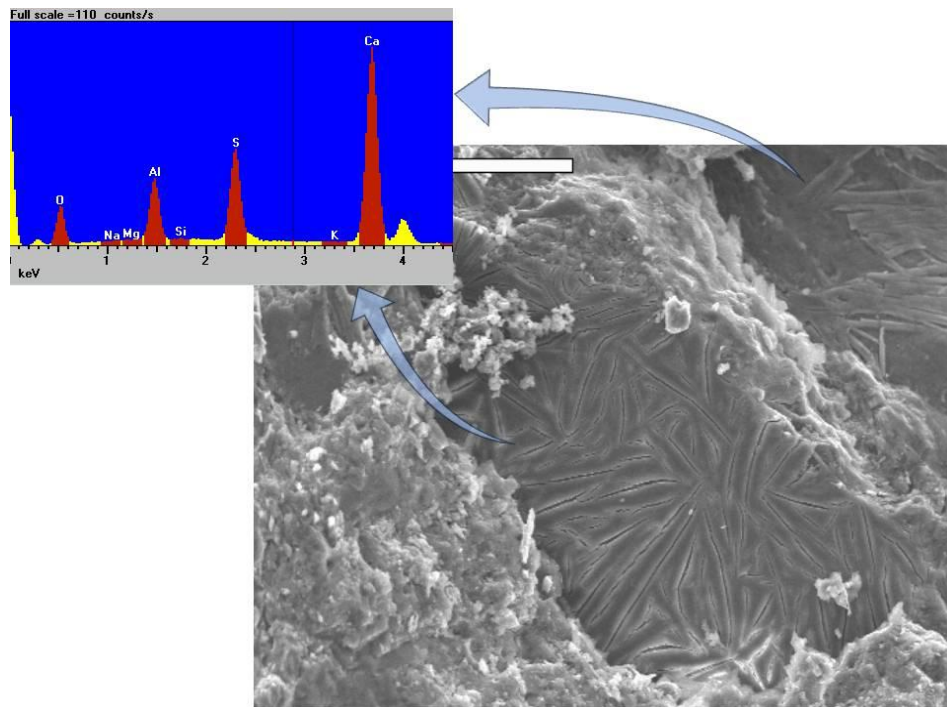


Figura 2.14. Etringita secundaria muy densificada en una interfase árido-pasta, posiblemente expansiva (SEM-EDX) (Menéndez, 2010).

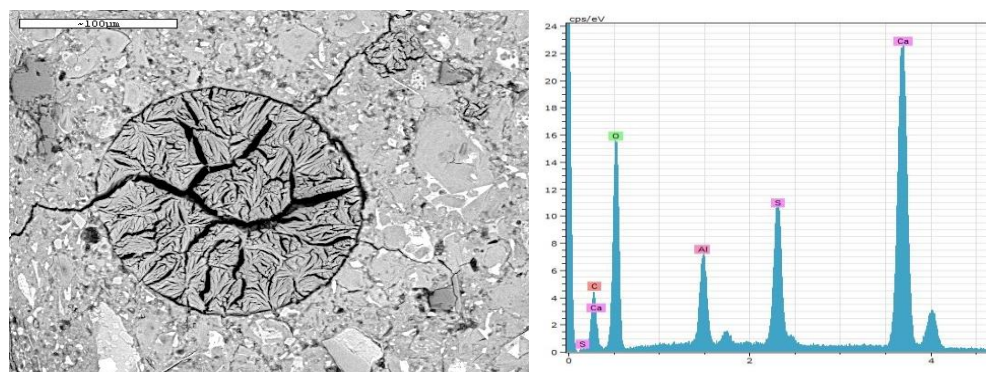


Figura 2.15. Etringita secundaria expansiva, relleno completamente un poro y generando la formación de fisuras (BSE-EDX) (Menéndez, 2010).

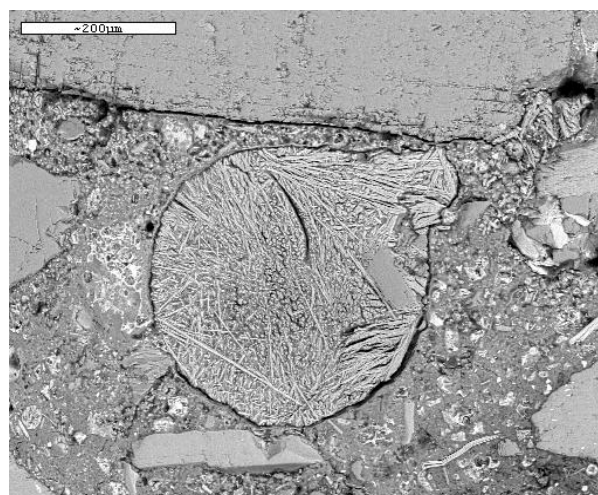


Figura 2.16. Etringita secundaria muy densificada relleno completamente un poro de aire, que puede generar expansividad (BSE-EDX) (Menéndez, 2010).

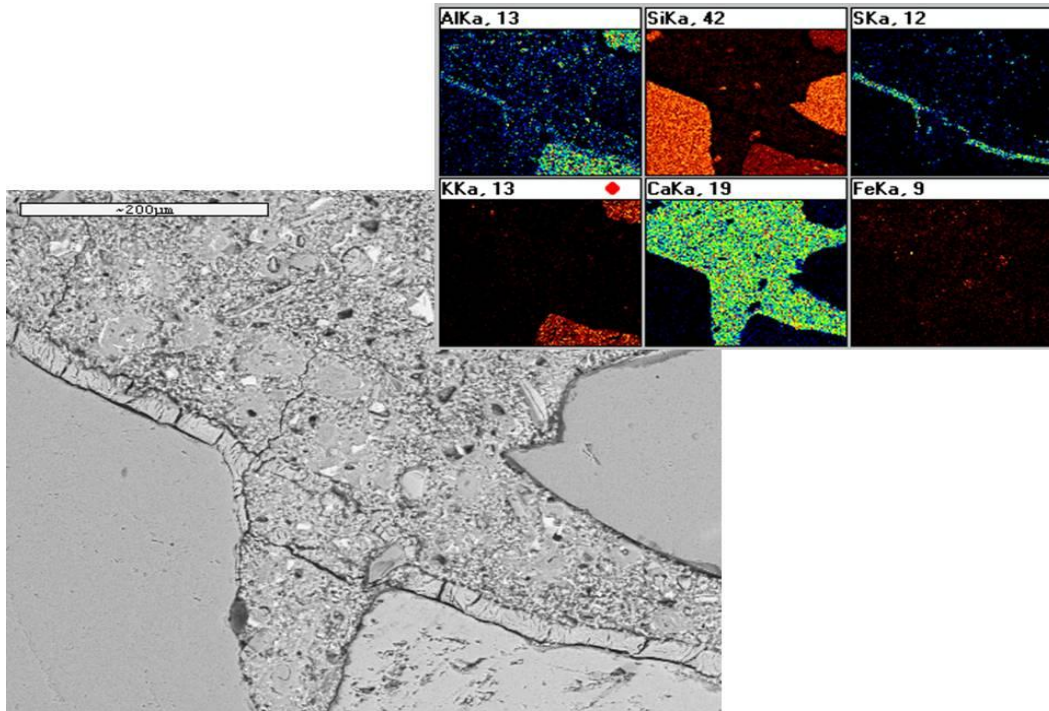


Figura 2.17. Etringita secundaria muy cristalizada en interfaces árido-pasta induciendo algunas fisuras, posiblemente expansiva (BSE-EDX) (Menéndez, 2010).

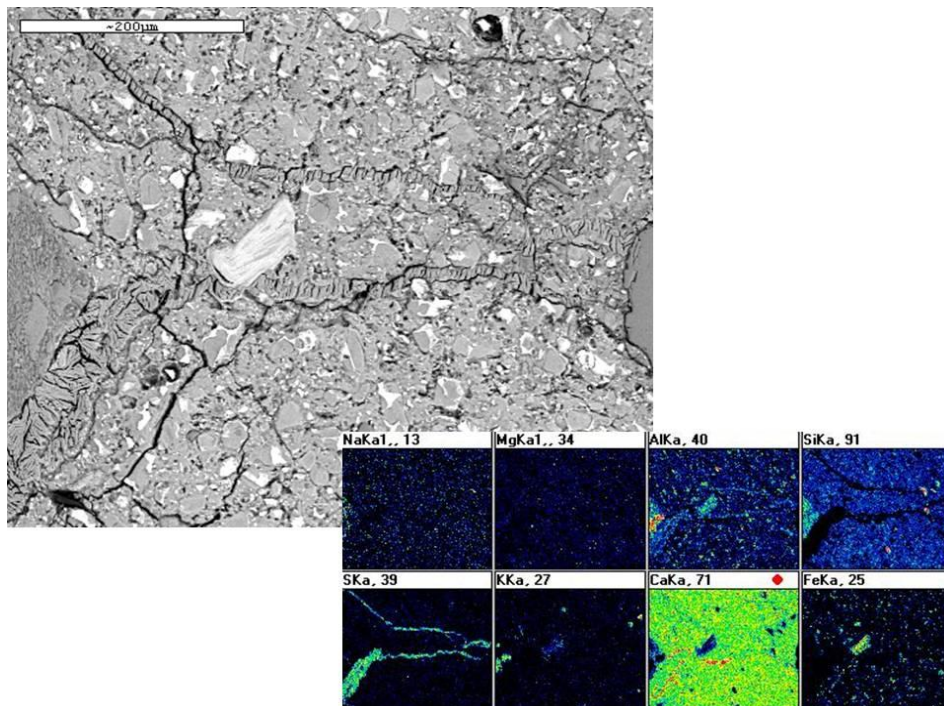


Figura 2.18. Etringita secundaria expansiva, rellenando fisuras en la pasta cementante y en interfase árido-pasta (BSE-EDX) (Menéndez, 2010).

Lo más habitual en el hormigón de las presas es que, cuando aparecen cristalizaciones de etringita, estas sean diferidas no expansivas, debido a un elevado calor producido durante el proceso de curado en grandes volúmenes de hormigón. Esto es más frecuente verlo en hormigones antiguos, ya que actualmente el calor de hidratación se controla exhaustivamente durante la puesta en obra. Además, el uso de adiciones y cementos de bajo calor de hidratación ayuda al control de la temperatura haciendo que esta sea inferior durante la hidratación.

2.4. Simultaneidad de reacciones RAS y AIS

Como se ha indicado anteriormente, los procesos de ataque interno por sulfatos, debido a la presencia de piritas o pirrotinas, produce expansión. Cuando este proceso se superpone con la reacción árido-álcali se produce una sinergia que hace que ambas reacciones se aceleren por la fisuración que generan y la apertura de nuevos centros de reacción.

La cinética de ambas reacciones es distinta, se considera que el periodo de iniciación es más corto para la reacción árido-álcali que para el ataque interno por sulfatos. Por su parte, el periodo propagación es más rápido en el ataque por sulfatos que en la reacción árido-álcali, si bien cualquiera de estos procesos está condicionado por el ambiente al que están sometidos. Esto implica que, generalmente, la degradación se inicia con la reacción árido-álcali y luego se inicia el ataque interno por sulfatos, por la menor accesibilidad de los agresivos a las piritas o pirrotina.

Por otra parte, se puede observar reacción árido-álcali y formación de cristalizaciones de etringita diferida. La formación de estos tipos de etringita en principio no genera daños por expansión, pero pueden llegar a aumentar el grado de daño por RAS si rellenan huecos y poros evitando que se puedan depositar en estos los productos de la reacción árido-álcali.

En cualquier caso, es necesario diagnosticar adecuadamente el origen de la formación de etringita, con el fin de analizar si existe realmente un ataque interno por sulfatos o cristalizaciones no expansivas.

2.5. Bibliografía

ACI 201.2R-16 (2016): *Guide to Durable Concrete*. Chapter 5. Reported by ACI Committee 201. American Concrete Institute

ASTM C114, 2022 Edition (2022): *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. ASTM International

ASTM C150, 2007 Edition (2007): *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International

Bleszynski R.F. y Thomas M.D.A. (1998): "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions", *Advanced Cement Based Materials*, 7, pp. 66-8

Chatterji S. (1979): "The Role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the Breakdown of Portland Cement Concrete due to Alkali-Silica Reaction", *Cement and Concrete Research*, 9(2), pp. 185-188

Chatterji S. y Clausson-Kass N.F. (1984): "Prevention of Alkali-Silica Expansion by Using Slag-Portland Cement", *Cement and Concrete Research*, 14(6), pp. 816-818

Del Hoyo R., Mayoral C., Perez D., Martinez F. y Herrador M. F. (2008): "Reacciones expansivas en el hormigón de varias presas. Localización y diagnóstico" en *VIII Jornadas Españolas de Presas (CNEGP-SPANCOLD)* Córdoba, 26-28 Nov 2008

Dent Glasser L. S. y Kataoka N. (1981): "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reactions", *Cement and Concrete Research*, 11 (3), pp 1-9

Diamond S. (1989): "ASR - Another Look at Mechanisms", en *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, (Eds. K. Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura), Kyoto, Japan, 83-94

EHE-08, MIN. DE FOMENTO (2008): *Instrucción de hormigón estructural*. EHE-08. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio

- Farny J.A. y Kerkhoff, B. (2007): *Alkali-Silica Reaction. Mechanism of ASR*. Concrete Technology. PCA
- Gadea J., Soriano J., Martín A., Campos P. L., Rodríguez A., Junco C., Adán I. y Calderón, V. (2010): “Reactividad árido-álcali en áridos empleados para hormigón”, *Materiales de Construcción*, 60 (299), pp. 69-78
- Gao X.X. (2010): *Contribution to the requalification of Alkali Silica Reaction (ASR) damaged structures: Assessment of the ASR advancement in aggregates*. PhD thesis, University of Toulouse, France
- Hansen W.C. (1944): “Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction proceeds in concrete”, *Journal of the American Concrete Institute*, 15 (3), pp. 213-227
- Helmuth R. A. y Stark D. (1992): *Alkali-silica reactivity mechanisms*, Materials Science of Concrete III, Skalny, J. (Eds.) American Ceramic Society. Waterville, Ohio
- Hobbs, D.W. (1988): Alkali-silica reaction in concrete. Ed. Thomas Telford, London (England). ICOLD (1991): Bulletin 79. *Alkali-aggregate reaction in concrete dams*
- Islam M.S. y Akhtar S. (2013): “A critical assessment to the performance of Alkali-Silica reaction (ASR)”, *Concrete Canadian Chemical Transactions*, 1 (4), pp. 253-266
- Katayama T. (2012): *Petrographic study of alkali-aggregate reactions in Concrete*. Doctoral Thesis (Science), University of Tokyo
- MacDonald C.A., Rogers C. y Hooton, R.D. (2012): “The relationship between laboratory and field expansion – observations at the Kingston outdoor exposure site for ASR after twenty years”, en *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Austin, TX, USA
- Menéndez, E. (2010) *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ISBN: 978-84-89702-24-0 (Autorizado por Esperanza Menéndez, propietaria del @)
- Menéndez E. (2011): “Evaluation and gradation of simultaneous damage in concrete affected by alkali-silica reaction and sulfate attack”, *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, 2 (2), March 2011
- Menéndez, E. (2013): “Spanish experience with AAR & ISA”, *ICOLD 2013 Congress. Post Tour & Workshop B4- Southeastern US Dams with Alkali-Aggregate Reactions*. Atlanta (USA)
- Menéndez, E.; García-Rovés, R.; Prendes, N. (2015) Metodología avanzada de evaluación petrográfica de áridos para predecir su potencial reactividad frente a los álcalis del hormigón, In *Proc. IV Congreso Nacional de Áridos*, Madrid
- Menéndez, E.; García-Roves, R.; Aldea, B.; Puerto, E.; Recino, H. (2021) Study of the alkali-silica reaction rate of Spanish aggregates. Proposal of a classification based in accelerated mortar bars tests and petrographic parameters. *Mater. construcc.* 71 [344], e263 <https://doi.org/10.3989/mc.2021.13421>
- Poole A. B. (1992): *Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete*. Swamy, R. N. (Ed.) The alkali silica reaction in concrete. Glasgow: Blackie and Son
- Poyet S., Sellier A., Capra B., Foray., Torrenti J.M., Cognon H. y Bourdarot E. (2007): “Chemical modelling of alkali-silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution”, *Materials & Structures*, 40. pp 229-239
- Prendes, N.; Menéndez, E. (2007) : “Digital image processing and MEB (BSE) Techniques in the identification and quantification of minerals phases present in cement and concrete”. *MRS Online Proc. Library 1026*. 404. <https://doi.org/10.1557/PROC-1026-C04-04>
- Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J.H. y Thomas, M.D.A. (2015): “Alkali-silica reaction. Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps” *Cement and Concrete Research*, 7, pp.130-146
- Segarra J. (2005): *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón*. Tesina, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. UPC
- SPRINT Project RA-419 (1993): *Advanced Quality Control of Concrete (1992-93)*. IS-SPRINT 1 - Strategic programme (EEC) for innovation and technology transfer (SPRINT), 1989-1994
- Stanton T. E. (1940): “Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate”, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 66 (10); pp. 1781-1811
- Stark D. (1991): “The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity”, *Proc. Durability of Concrete. 2nd International Conference*. Montreal, Canada. Vol. II, pp 973-987, Aug. 4-9, 1991

Taylor H. F. W. (1997): *Cement Chemistry*. 2nd Ed. Thomas Telford

Thomas M.D.A., Nixon P.J. y Pettifer, K. (1991): "The effect of pfa on alkali-silica reaction", en *Second CANMET/ACI Conference on the Durability of Concrete* (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-126, II, American Concrete Institute, Detroit, 919-940

Thomas M.D.A. (1998): "The Role of Calcium in Alkali-Silica Reaction. Materials Science of Concrete", en *The Sidney Diamond Symposium*, (Eds. M. Cohen, S. Mindess, and J.P. Skalny), American Ceramic Society, Westerville, OH, 325-331

Thomas M.D.A. (2001): *The role of calcium hydroxide in alkali recycling in concrete. Materials Science of Concrete Special Volume on Calcium Hydroxide in Concrete*, (Eds. J. Skalny, J. Gebauer, and I. Odler), American Ceramic Society, Westerville, OH, 269-280

Thomas M.D.A., Fournier B., Folliard K., Ideker J. y Shehata, M. (2006): "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, 36 (10), pp 1842-1856

Touma W. E., Fowler D. W. y Carrasquillo R. L. (2001): "Alkali-silica reaction in Portland cement concrete: testing methods alternatives" en *International Centre for Aggregates Research (ICAR)*, Research Report ICAR-301-1F

UNE-EN 196-2 (2014): *Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos*, UNE

Wang H. y Gillott J.E. (1991): "Mechanism of Alkali-Silica Reaction and the Significance of Calcium Hydroxide", *Cement and Concrete Research*, 21(4), pp. 647-654

3. Prevención

3.1. Prevención de la reacción álcali-sílice

En la prevención de la reacción árido-álcali generalmente se aplican principios reglamentarios, basados en normas que afectan a los constituyentes del hormigón. En la reglamentación española, actualmente recogida en el Código Estructural (MITMA, 2021) se aplica un concepto prescriptivo de los materiales y una serie de recomendaciones cuando los áridos son potencialmente reactivos.

No obstante, hay algunos países, como Francia, en los que la reglamentación tiene aspectos mucho más prestacionales, basados en la validación de las mezclas de hormigón. También RILEM ofrece por un lado recomendaciones de ensayos (Nixon, 2016) y documentos prestacionales donde se recoge una estrategia más compleja, con la designación AAR-7.1, para reacción álcali-sílice, y AAR-7.2, para la reacción álcali-carbonato. Estos documentos están basados fundamentalmente en la normativa y prescripciones francesas, en la que se asignan distintas categorías de ambientes y estructuras, para llegar a una estrategia de prevención aplicando distintas medidas en función del riesgo potencial del hormigón estructural.

Por su parte, en la Monografía *Estrategia Integral para la Prevención de la Reacción Árido-álcali* (Menéndez, 2019), publicada por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), se recoge un resumen de diferentes estrategias a nivel internacional, y se analiza la influencia de los diferentes componentes del hormigón y su potencial contribución al desarrollo de la RAS. En base a esto se analiza la estrategia prescriptiva aplicada habitualmente en España, proponiéndose como alternativa una estrategia prestacional, en base a las características de los componentes del hormigón, y aplicable a las dosificaciones de obra. La estrategia prestacional propuesta es bastante más compleja que la prescriptiva, por lo que se debe realizar por especialistas cualificados y es especialmente aplicable a obras singulares, como presas, instalaciones nucleares u obras de especial envergadura.

3.1.1. España. Código Estructural, Instrucción EHE-08, normas UNE y metodología avanzada de prevención

3.1.1.1. Código Estructural e Instrucción EHE-08

La norma española de referencia para el hormigón estructural es el *Código Estructural*, que ha sustituido a la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Con relación a la reacción árido-álcali, el Código mantiene una redacción prácticamente igual a la *EHE-08* y ambos se fundamentan en el planteamiento clásico, basado principalmente en la evaluación de los áridos

y la recomendación de utilización de cementos de bajo contenido en álcalis, cuando los áridos a utilizar son calificados como potencialmente reactivos.

El tratamiento de los componentes del hormigón en el Código Estructural, relacionados con la reacción árido-álcali, es el siguiente:

- Cementos: No se especifica nada en el Artículo 28 del *Código Estructural*, si bien el Pliego de Recepción de Cementos (RC-16) recoge como cementos de bajo contenido en álcalis aquellos que tienen un contenido de álcalis $< 0,6\%$, expresado con óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$) en peso de cemento. Este aspecto del cemento se incluye en el apartado 43.3.4.3 del Código Estructural, dentro del capítulo de Durabilidad.
- Agua: En el Artículo 29 del Código Estructural se recogen las especificaciones del agua de amasado, en la Tabla 29. Las características, limitaciones y normas a aplicar son iguales que en las recogidas en la EHE-08, salvo que se incluye una limitación en el contenido de álcalis $\leq 1,5 \text{ g/l}$ como regla general, expresado como óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$).
- Áridos: En la Tabla 30.7 del Código Estructural se recogen los requisitos químicos de los áridos, en la que se limitan los compuestos totales de azufre, los sulfatos solubles en ácido y los cloruros.

Con relación específicamente a la reacción árido-álcali el Código Estructural menciona las normas UNE 146507-2, UNE 146508 y UNE 146509 y define la norma de prismas de hormigón (UNE 146509) como decisoria para considerar un árido como potencialmente reactivo e incluye una mención al apartado 43.3.4.3 de Durabilidad.

- En cuanto a los áridos reciclados, la consideración frente a la reacción árido-álcali es similar en redacción y exigencias en el Código Estructural que en la EHE-08, si bien en el Código Estructural, pasa de la parte de Comentarios a la del Articulado, en concreto, en el Artículo 30, *Áridos*.

Dentro del Artículo 43 *Estrategia de durabilidad en los elementos de hormigón, (Apartado 43.3.4 de Resistencia frente al ataque químico, que incluye el ataque por sulfatos, el ataque por agua de mar y la prevención de la reactividad álcali-árido)* del Código Estructural, se consideran **tres** posibles acciones para prevenir la reacción si no es posible utilizar áridos no reactivo:

- a) Usar cementos con adiciones;
- b) Incorporar adiciones al hormigón, humo de sílice o cenizas volantes;
- c) Emplear cementos con bajo contenido en álcalis.

Se recomienda un estudio experimental para aplicarlas, para lo que pueden tomarse en consideración tres procedimientos publicados en la normativa española (UNE 83967, UNE 83968 y UNE 83969).

En esencia, la estrategia de durabilidad del Código Estructural para evitar las reacciones árido-álcali es puramente prescriptiva y se mantiene con la misma redacción de la *EHE-08*.

En primer lugar, indica la necesidad de realizar una caracterización petrográfica de los áridos. Para ello se utiliza el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 932-3. Esta norma es muy poco definitoria para los áridos con relación a la reacción árido-álcali, por lo que sería más conveniente la utilización de la recomendación RILEM AAR 1.1.

En la Figura 3.1 se recoge un esquema de los ensayos para la evaluación de la potencial reactividad de los áridos frente a la reacción árido-álcali y en la Figura 3.2 se recogen las medidas para su prevención, según lo recogido en el Código Estructural, similar a la EHE-08.

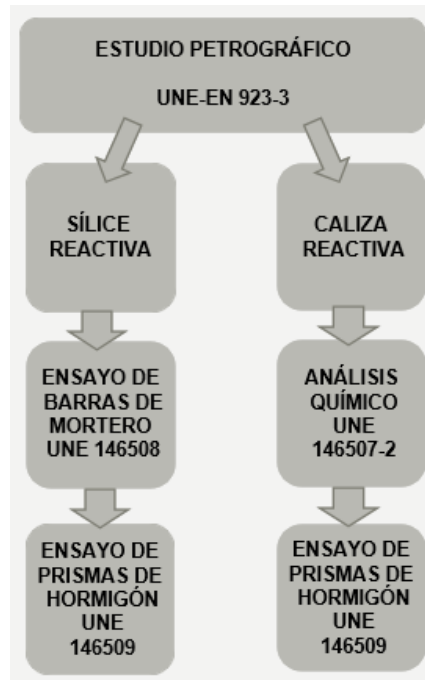


Figura 3.1. Ensayos para la prevención de la reacción árido-álcali, según el Código Estructural.

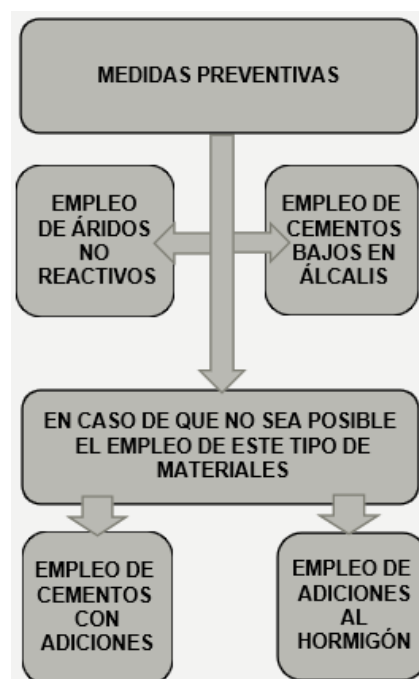


Figura 3.2. Medidas para la prevención de la reacción árido-álcali, según el Código Estructural.

Para verificar la eficacia de las medidas, se pueden utilizar los procedimientos de ensayo descritos en las normas UNE 83508, UNE 83509 y UNE 83507, aplicando las especificaciones indicadas en la norma UNE 146508 para los métodos de las normas UNE 83508 y UNE 83509, y los requisitos establecidos por la Guía FD P18-464 (AFNOR, 2004) para el procedimiento de la norma UNE 83507.

3.1.1.2. Otras normas UNE para la evaluación de la reacción árido-álcali

El denominado “método químico”, correspondiente a norma UNE 146507-1 Ensayos *de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato*. Este método de ensayo es utilizado por algunos laboratorios para validar la no reactividad de los áridos. No obstante, ***está anulado por falta de precisión para detectar los áridos potencialmente reactivos***.

Las normas UNE en general son prescriptivas y están basadas en la caracterización de los áridos por petrografía o en cuanto a su expansividad, en barras de mortero o prismas de hormigón. En los comentarios del Código Estructural se indica que cuando sea necesario utilizar áridos potencialmente reactivos hay que hacer un estudio exhaustivo por parte de un laboratorio especializado. Para ello se pueden utilizar las normas UNE 83967, UNE 83968 y UNE 83969. Estas normas UNE permiten explorar el comportamiento de mezclas de áridos, de mezclas de conglomerante y realizar ensayos de dosificaciones de hormigón similares a las utilizables en obra, con la limitación derivada del tamaño máximo de árido, debido al tamaño de las probetas utilizadas.

Para verificar la eficiencia de las medidas preventivas para la reacción árido-álcali, propuestas por el Código Estructural se pueden utilizar las normas UNE 83508, UNE 83509 y UNE 83507, con los límites recogidos en la norma UNE 146508, para las normas UNE 83508, UNE 83509 y el límite establecido por la Guía FD P18-464 (AFNOR, 2004).

Las normas UNE 83968 *Evaluación de la expansión de probetas de mortero utilizando mezclas de áridos potencialmente reactivos y no reactivos, frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato* y UNE 83969 *Evaluación de la expansión de probetas de mortero utilizando conglomerantes y áridos potencialmente reactivos frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato*, permiten:

- Seleccionar mezclas de áridos potencialmente no reactivas, mediante la combinación de distintos porcentajes de áridos potencialmente reactivos y no reactivos.
- Seleccionar conglomerantes adecuados, con diferentes tipos y porcentajes de adición, para moderar la expansión asociada con la reactividad de áridos potencialmente reactivos.

Para verificar la no expansividad de las mezclas de hormigón se utilizar el método de ensayo descrito en la norma UNE 83967: *Método de ensayo para evaluación de la expansión potencial por reacción árido-álcali de dosificaciones de hormigón. Método semi-acelerado de prismas de hormigón*, que permite analizar la potencial expansión de mezclas de hormigón,

con tamaño de árido máximo de 20 mm, en un periodo de 140 días (20 semanas), ensayando los prismas de hormigón a 100 % de humedad relativa y 60 °C de temperatura.

Estas normas UNE permiten un diseño de mezclas de áridos y de selección de conglomerantes, además de la evaluación de mezclas reales de hormigón. En la Figura 3.3 se recoge un esquema de las normas UNE para diseño de mezclas de componentes y de hormigón (Menéndez, 2019).

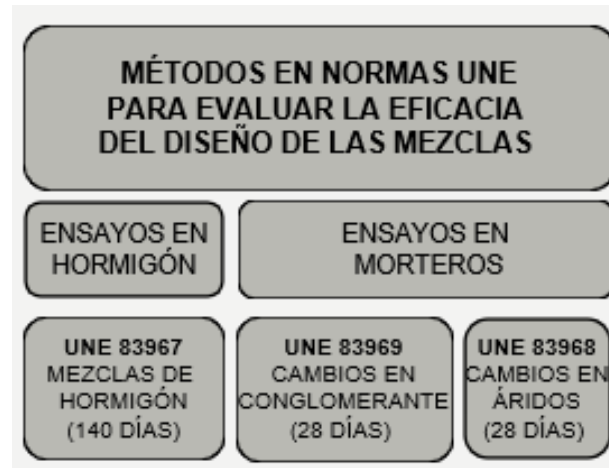


Figura 3.3. Normas UNE para diseño y verificación de mezclas de hormigón utilizadas en obra.

Las normas UNE en general son prescriptivas y están basadas en la caracterización de los áridos por petrografía o en cuanto a su expansividad, en barras de mortero o prismas de hormigón. El Código Estructural es aún más limitado, pues no contempla la utilización de las normas UNE 83967, UNE 83968 y UNE 83969. Estas normas UNE permiten explorar el comportamiento de mezclas de áridos, de mezclas de conglomerante y realizar ensayos de dosificaciones de hormigón similares a las utilizables en obra, con la limitación derivada del tamaño máximo de árido, debido al tamaño de las probetas utilizadas.

A continuación, en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2 se recogen, respectivamente, las normas UNE utilizadas en el *Código Estructural* para prescribir la prevención de la RAS, y las normas UNE utilizadas en el *Monografía del IETcc N° 430: Estrategia Integral de Prevención de la RAA*. (CSIC, 2019)

Tabla 3.1. Normas UNE, recogidas en el *Código Estructural* (prescriptivo) para calificar los áridos frente a la reacción árido-álcali. Comparación entre tamaños de árido, dosificación de cemento, tiempo de ensayo y disoluciones de ensayo.

Denominación	Norma	Árido	Cemento	Temperatura	Tiempo	Disolución
<i>Calificación de áridos dolomíticos</i>						
Petrografía	UNE-EN 923-3	Descriptivo	---	---	15 – 30 días	---
Ensayo químico	UNE 146507-2	Fino < 2,5mm	---	80°C	5 días	1N NaOH
Prismas de hormigón – Método no acelerado	UNE 146509	Grueso < 20mm Fino < 5mm	420 kg/m ³	38°C	1 año	100% H.R.
<i>Calificación de áridos silíceos</i>						
Petrografía	UNE-EN 923-3	Descriptivo	---	---	15 – 30 días	---
Barras de mortero – Método acelerado	UNE 146508	Fino < 5mm	Árido:cemento 2,25	80°C	14 o 28 días	1N NaOH
Prismas de hormigón – Método no acelerado	UNE 146509	Grueso < 20mm Fino < 5mm	420 kg/m ³ + 1,25% álcalis	38°C	1 año	100% H.R.

Tabla 3.2. Normas UNE, recogidas en el *Manual de Estrategia Integral para la Prevención de la Reacción Árido-Álcali* (prestacional) (Menéndez, 2019). Comparación de tamaños de árido, dosificación de cemento, tiempo de ensayo y disoluciones de ensayo.

Denominación	Norma	Árido	Cemento	Temperatura	Tiempo	Disolución
<i>Calificación de áridos silíceos</i>						
Petrografía	RILEM AAR-1.1	Cuantificación Clasificación	---	---	15 – 30 días	---
Barras de mortero – Método acelerado	UNE 146508	Fino < 5mm	Árido:cemento 2.25	80°C	14 o 28 días	1N NaOH
<i>Diseño de mezclas de áridos</i>						
Barras de mortero – Método acelerado	UNE 83968	Fino < 5mm	Árido:cemento 2.25	80°C	14 o 28 días	1N NaOH
<i>Diseño de mezclas de conglomerantes</i>						
Barras de mortero – Método acelerado	UNE 83969	Fino < 5mm	Árido:cemento 2.25	80°C	14 o 28 días	1N NaOH
<i>Diseño y verificación de mezclas de hormigón de obra</i>						
Prismas de hormigón – Método no acelerado	UNE 146509 modificado	Granulometría de obra	Obra + álcalis suplementarios	38°C	52 semanas	100% H.R.
Prismas de hormigón – Método semi-acelerado	UNE 83967	Granulometría de obra	Obra + álcalis suplementarios	60°C	20 semanas	100% H.R.

3.1.1.3. Metodología avanzada de diseño de mezclas de hormigón no expansivas, Monografía IETcc-CSIC

Para la prevención de la reacción álcali-sílice se pueden aplicar distintas estrategias, bien basadas en el ensayo y la selección solo de los componentes, o bien basadas en el diseño de mezclas de hormigón. Sin embargo, una estrategia avanzada de diseño de hormigones no reactivos integra la información obtenida en los ensayos de componentes, incluyendo la información obtenida de ensayos complementarios especialmente útiles para la prevención de la expansión a largo plazo, y de mezclas (Menéndez, 2018 y 2019).

3.1.1.3.1. Diseño de mezclas de hormigón no expansivas

Si bien los ensayos de componentes permiten seleccionar componentes no reactivos, es necesario garantizar que la mezcla de hormigón no sea expansiva y que no se desarrolle la reacción álcali-sílice. Para ello, es necesario evaluar la dosificación del hormigón de obra, con la proporción correspondiente de cada componente. Se pueden obtener mezclas de hormigón no reactivas utilizando componentes que, a priori, estarían calificados como inadecuados, cuando se diseñan correctamente. Además, el ensayo de mezclas permite utilizar diferentes dosificaciones de áridos, cementos, adiciones, etc. Dependiendo de la obra será necesario utilizar un solo tipo de árido aunque también es posible diseñar una mezcla de áridos potencialmente reactivos y no reactivos, hasta conseguir obtener una mezcla no reactiva. Para ello se puede utilizar el método de ensayo de la norma UNE 83968. Con relación al cemento puede utilizarse cementos de bajo contenido en álcalis o utilizar cementos con adiciones. En este último caso se puede establecer el porcentaje adecuado de adición para minimizar la expansión, utilizando el método de ensayo de la norma UNE 83969. También, hay que evaluar la potencial extracción de álcalis desde los áridos y las adiciones, para lo que existen diversos métodos de ensayo aún no normalizados (Menéndez, 2018). Hay que tener en cuenta que las presas son especialmente sensibles a la potencial lixiviación de álcalis de las adiciones y de los áridos, al estar en contacto permanente con agua.

Finalmente, el ensayo propuesto para la evaluación de las mezclas de hormigón, por ser el que tiene mayor nivel de seguridad, y dilatada experiencia en Francia y España, es el ensayo semi-acelerado de prismas de hormigón, en el que los prismas de hormigón se ensayan a 60 °C durante de 20 semanas (norma UNE 83967). Otro ensayo utilizado habitualmente para evaluar mezclas de hormigón (norma UNE 146509) se efectúa sobre prismas conservados a 38 °C, si bien este tiene una sensibilidad menor que el ensayo semi-acelerado, dando frecuentemente falsos negativos, y con la problemática asociada a su elevada duración, que se extiende hasta 12 meses.

3.1.1.3.2. Metodología avanzada de prevención de la reacción álcali-sílice. Estrategia prestacional

Una metodología avanzada de prevención de la reacción árido-álcali requiere la evaluación integrada de las características de los componentes, de su expansión y de la determinación de los álcalis extraíbles de los áridos y de las adiciones. A partir de estos resultados, se pueden diseñar y evaluar mezclas de hormigón, utilizando las dosificaciones reales o lo más próximas posible.

La caracterización de los componentes, el diseño de mezclas de áridos reactivos y no reactivos, la evaluación de la eficacia de mezclas de conglomerantes y la determinación de los álcalis lixiviables, permite diseñar mezclas de hormigón con una mínima restricción en cuanto a la selección de los componentes del hormigón y a la dosificación de estos. Esto es especialmente conveniente en el caso de construcciones en las que se requieren grandes volúmenes de material y la utilización de áridos de la zona, como las presas (Menéndez, 2018 y 2019).

En la Figura 3.4 se recoge un esquema de la metodología avanzada para el diseño y verificación de mezclas de hormigón no expansivas a largo plazo.

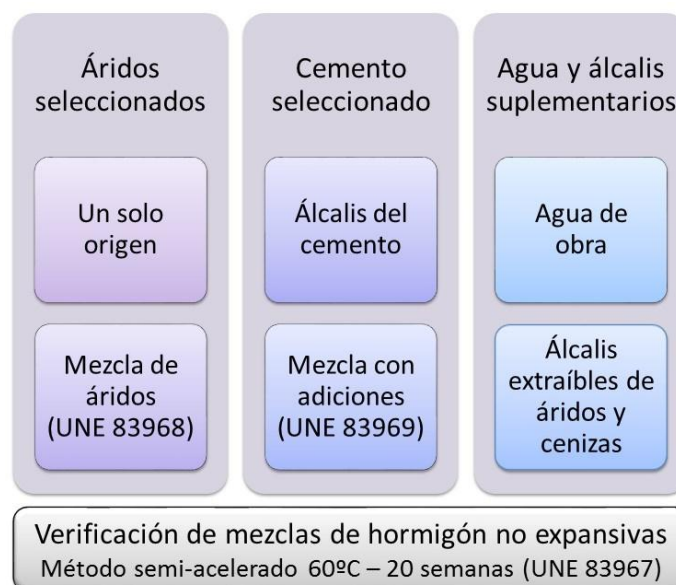


Figura 3.4. Estrategia prestacional de verificación de mezclas no expansivas

Esta metodología se ha aplicado en los últimos diez años en elementos de hormigón, curados a alta temperatura, con resultados adecuados, sin que se hayan producido hasta el momento alteraciones debido a RAS. También se ha aplicado a la evaluación de hormigones para ser utilizados en grandes volúmenes, sin que hasta el momento se haya detectado problemas de reactividad álcali-sílice. En todos los casos se han utilizado, al menos parcialmente, áridos potencialmente reactivos Especificación técnica Adif: Traviesas monobloque de hormigón pretensado: ET 03.360.571.8 (ADIF, 2020).

3.1.2. Estrategias de prevención a nivel internacional

A nivel internacional existen diferentes estrategias para la prevención de la reacción álcali-sílice, una de la más completa es la reglamentación francesa, basada en las normas AFNOR. Por su parte, las recomendaciones RILEM se basan, en gran medida, en la reglamentación francesa, si bien, para determinar las limitaciones o recomendaciones para prevenir la reacción álcali-sílice, se profundiza algo más en las cuestiones ambientales y en las características de las estructuras.

A continuación, se recogen las principales estrategias de prevención a nivel internacional, analizando la reglamentación francesa (AFNOR) que puede considerarse como una de las estrategias más completas a nivel mundial. Así mismo, se describe la estrategia de las normas norteamericanas ASTM, por su gran incidencia en todo el continente americano, y las recomendaciones internacionales RILEM, que constituyen habitualmente la base para la realización de normas a nivel internacional en este ámbito de actuación.

3.1.2.1. Francia. Normativa AFNOR

La normativa francesa tiene diversos ensayos para la caracterización de componentes y de mezclas de hormigón. Se considera más avanzada que la mayoría de las reglamentaciones europeas, ya que tiene una estrategia completa para prevenir la reactividad árido-álcali en el hormigón. El *enfoque es preventivo* y tiene una filosofía basada en la responsabilidad de los actores de la construcción, la mejor gestión de los recursos naturales y la construcción sostenible al mejor precio; para ello se necesita el conocimiento de los constituyentes, mediante el estudio por métodos normalizados.

El enfoque preventivo: Se recoge en la norma FD P18-464 Guía para la prevención de la reacción árido-álcali.

Para la prevención se diferencian varias fases:

Determinación del nivel de prevención de las obras de hormigón: Se definen tres categorías (Categorías I, II o III), siendo la Categoría III la más restrictiva. Estas categorías se asocian con el riesgo de la obra varias categorías en función de sus características, ubicación, importancia estratégica y económica, tamaño, su uso, las limitaciones que generarían las intervenciones de mantenimiento, etc.

1. *Niveles de prevención en función de las clases de ambientes*: Se establecen tres posibles niveles A, B o C de prevención, en función de la clase de exposición ambiental y de la categoría de la obra. En la Tabla 3.3 se recogen los niveles de prevención requeridos.

Tabla 3.3. Niveles de prevención en función de la categoría de la obra y el tipo de exposición.

Categoría de la obra	Clase de ambiente			
	<i>Seco o poco húmedo</i>	<i>Húmedo y agua</i>	<i>Húmedo con hielo-deshielo</i>	<i>Medio marino</i>
I. Riesgo bajo, aceptable	A	A	A	A
II. Riesgo poco aceptable	A	B	B	B
III. Riesgo inaceptable	C	C	C	C

Los niveles de protección se refieren a:

- *Nivel A*: No se requieren precauciones especiales.
- *Nivel B*: Son la mayoría de las obras, indican que tipos de áridos utilizar para evitar la RAS.
- *Nivel C*: Obras más restrictivas, hay que realizar estudios específicos para las mezclas de hormigón.

Las normas aplicables en estos estudios son: FD P18-542 y NF P18-454, según los límites establecidos en la norma FD P18-456.

Evaluación de mezclas: Para la verificación de la no reactividad se utiliza el método de ensayo de la norma NF P18-454 y el límite establecido en la norma FD P18-456, calculando previamente el balance de álcalis, según la norma XP P18-544.

El esquema de la metodología de prevención de AFNOR, para la prevención de la reacción árido-álcali se recoge en la Figura 3.5.

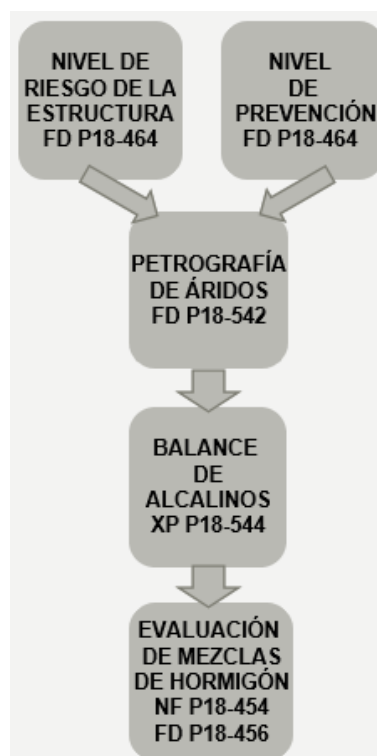


Figura 3.5. Esquema de la metodología de prevención AFNOR.

3.1.2.2. Norteamérica. Normativa ASTM y recomendaciones AASHTO

En Norteamérica se han detectado e identificados casos tanto de reacción álcali-carbonato como de reacción álcali-sílice, por lo que se establecen metodologías claramente diferenciadas para ambos tipos de reacciones. Sin embargo, en muchos casos la identificación de los casos de reacción álcali-carbonato están en cuestión y se considera que puede tratarse de rocas calcáreas con inclusiones de sílice potencialmente reactivas.

- *Normativa para la prevención de la reacción de álcali-carbonato*

La reacción álcali-carbonato es una reacción de desdolomitización. Para su prevención se utiliza en primer lugar el análisis petrográfico, aplicando la norma ASTM C295. Por su parte, los métodos de ensayo para determinar la potencial reacción álcali-carbonato incluyen el ensayo de expansión de cilindros de roca, según el método de la norma ASTM C586, y el ensayo de expansión de prismas de hormigón, según la norma ASTM C1105.

- *Normativa para la prevención de la reacción de álcali-sílice*

La normativa aplicada en Norteamérica para la prevención de la reacción álcali-sílice es la siguiente: evaluación petrografía de los áridos (ASTM C295), determinación de la expansión por el método acelerado de barras de mortero (ASTM C1260) y norma ASTM C33, que recoge los requisitos aplicables para el empleo de los áridos para hormigón.

La norma ASTM C1293 describe el método de ensayo considerado como más realista, que se trata de un ensayo de larga duración de expansión de prismas de hormigón.

- *Estrategias de prevención de la reacción álcali-sílice, según ACI*

Según las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI), cuando el hormigón está expuesto a la humedad y a otras condiciones medioambientales adversas se recomienda la utilización de medidas para la prevención del daño por reacción álcali-sílice (ACI221.1R-98, 1998). Estas medidas de prevención son principalmente las siguientes:

- *Utilización de áridos no reactivos.*
- *Limitación de la cantidad de álcalis totales en el hormigón a 3,0 kg/m³ o inferior.*
- *Utilización de adiciones:* cenizas volantes, puzolanas naturales, escorias o humo de sílice. Para evaluar la eficacia de las adiciones se utilizan como métodos de ensayo habituales los recogidos en las normas ASTM C441, ASTM C1293 y ASTM C1567. Para analizar mezclas de hormigón se utiliza el ensayo de prismas de hormigón, ASTM C1293 que tiene una duración de 1 año.
- *Utilización de sales de litio:* El método CRD-C 662 es el ensayo utilizado evaluar la efectividad de la dosificación de mezclas de litio.

En la Figura 3.6 se recoge un esquema de las propuestas de ACI para la prevención de la reacción árido-álcali.

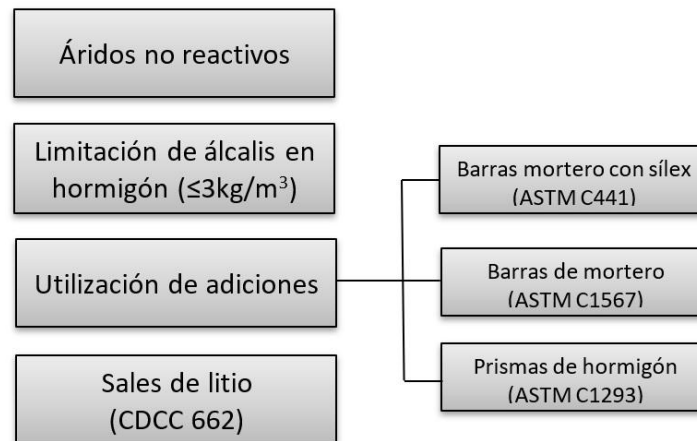


Figura 3.6. Esquema de la estrategia de prevención ACI.

Por último, el documento AASHTO PP 65-11 proporciona un método paso a paso para la evaluación de los áridos y una metodología prescriptiva basada en el comportamiento de los componentes del hormigón. Como ventaja respecto a las recomendaciones ACI, la norma AASHTO también incluye consideraciones relativas al nivel de riesgo de ocurrencia de la reacción árido-álcali.

3.1.2.3. RILEM. Recomendaciones, procedimientos de ensayo y estrategia de prevención de la reacción árido-álcali

La Red Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM) ha desarrollado distintas recomendaciones para la prevención de la reacción.

- *Recomendaciones de ensayos para la evaluación de la potencial reactividad de los áridos*

Se han publicado conjuntamente todos los métodos actualizados (Nixon, 2016) para la evaluación de la potencial reactividad de los áridos. Estos métodos son los siguientes:

- RILEM AAR-0 – Guía para la aplicación de los métodos RILEM para evaluar la potencial reactividad frente a los álcalis de los áridos.
- RILEM AAR-1.1 – Detección de la reactividad potencial de los áridos con los álcalis. Método de examen petrográfico.
- RILEM AAR-2 – Detección de la reactividad potencial con los álcalis. Método ultra-acelerado de barras de mortero.
- RILEM AAR-3 – Detección de la reactividad potencial. Método de ensayo para combinaciones de áridos usando prismas de hormigón.
- RILEM AAR-4 – Detección de la potencial reactividad con los álcalis. Método de 60 °C para combinaciones de áridos utilizando prismas de hormigón.
- RILEM AAR-5 – Ensayo rápido para la detección preliminar de la reacción álcali-carbonato.

Estas recomendaciones han sido complementadas con las recogidas recientemente en el número especial de Material & Structures *RILEM TC 258-AAA: Recommendations for Avoiding Alkali Aggregate Reactions in Concrete – Performance Based Concept* ISSN: 1359-5997, 1871-6873 (2022), que son:

- RILEM AAR-0: Guía para la aplicación de los métodos RILEM para evaluar la potencial reactividad frente a los álcalis de los áridos (versión 2022).
- RILEM AAR-8: Determinación de los álcalis potencialmente lixiviables de los áridos para hormigón.
- RILEM AAR-10: Determinación de combinaciones de conglomerantes para diseñar mezclas no reactivas de hormigón, usando el método de expansión de prismas de hormigón a 38 °C.
- RILEM AAR-11: Determinación de combinaciones de conglomerantes para diseñar mezclas no reactivas de hormigón, usando el método de expansión de prismas de hormigón a 60 °C.
- RILEM AAR-12: Determinación de combinaciones de conglomerantes para mezclas no reactivas de hormigón diseñadas para resistir a la reacción álcali-sílice en mezclas de hormigón utilizando el método de expansión de prismas de hormigón a 60 °C con álcalis suplementarios.
- RILEM AAR-13: Aplicación de envolturas con álcalis para ensayos de prismas de hormigón para la evaluación de la expansión potencial de la reacción álcali-sílice.

Estas nuevas recomendaciones abren mucho las posibilidades de evaluación de mezclas, sobre todo cuando la mezcla de hormigón está condicionada en uno o varios de sus componentes, o cuando hay características especiales de la estructura o medioambientales.

En la Figura 3.7 se recoge el esquema de la metodología de evaluación de la potencial reactividad de los áridos, utilizando los métodos de RILEM.

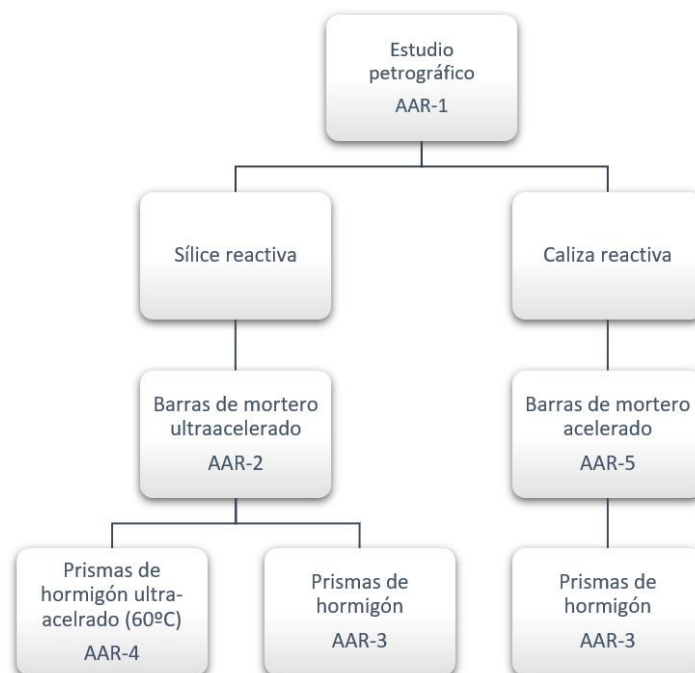


Figura 3.7. Esquema del sistema de prevención de la reacción árido-álcali, de acuerdo con las recomendaciones RILEM (Nixon, 2016).

- *Estrategia de prevención de la reacción árido-álcali. Evaluación de estructuras afectadas por reacción álcali-sílice y carbonato-álcali (Ver Capítulo 1 – Apartado 1.3.1)*

En la citada publicación (Nixon, 2016) también se recogen los documentos RILEM AAR-7.1 y RILEM AAR-7.2, que corresponden a guías para analizar las condiciones potenciales de agresividad, así como las consecuencias que, respectivamente, las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato, podrían tener sobre las estructuras afectadas en función del tipo de exposición.

En estos documentos se definen distintos aspectos relacionados con el tipo de estructuras, los factores que afectan a la reactividad y los niveles de protección recomendados. Estas definiciones son las siguientes:

- *Nivel de prevención requerido*, depende de la consecuencia del daño y de la probabilidad de daño.
- *Clases de exposición*, incluyen la definición de tres niveles riesgo estructural (R1, R2 y R3) en función de la tipología de las estructuras. Así mismo, se definen tres clases de exposición ambiental, E1, E2 y E3, de más protegida a más expuesta.
- *Medidas de precaución apropiadas para el nivel de prevención requerido*, se definen los niveles de precaución (P1 a P4), en función de las categorías estructurales definidas (S1, S2 y S3) y de los tipos de exposición ambiental considerados (E1, E2 y E3). Los niveles de precaución son:
 - *P1*: Sin necesidad de precauciones especiales con relación a la reacción árido-álcali
 - *P2*: Nivel normal de precaución con relación a la reacción árido-álcali
 - *P3*: Necesidad de un nivel de precaución especial
 - *P4*: Necesidad de un nivel de precaución extraordinario

Los niveles de precaución aplicables a las distintas estructuras se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Niveles de precaución

		<i>Categoría ambiental</i>		
		<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
<i>Categoría estructural</i>	<i>S1</i>	P1	P1	P1
	<i>S2</i>	P1	P2	P3
	<i>S3</i>	P2	P4	P4

Finalmente, se definen las medidas preventivas M1 a M4 y su aplicación para cada nivel de precaución (P1 a P4).

- *Medidas preventivas:*
 - *M1*: Limitar el contenido de álcalis, control del tipo y contenido de cemento, utilización de cementos bajos en álcalis e inclusión de suficiente cantidad de materiales suplementarios, como cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín u otras puzolanas.
 - *M2*: Utilización de áridos no reactivos.
 - *M3*: Evitar el acceso de la humedad.
 - *M4*: Asegurar la no formación de gel expansivo.

- Medidas preventivas en función del nivel de precaución:
 - P1 – Sin precauciones especiales, ninguna medida adicional
 - P2 – Nivel normal de precaución, una de las cuatro medidas establecidas, (M1, M2, M3 o M4)
 - P3 – Nivel de precaución especial, P2 más diseño para resistir los factores agravantes adicionales
 - P4 – Nivel de precaución extraordinario, aplicación combinada de dos o más medidas de precaución. **Este nivel de precaución es el que correspondería a las presas** y a otras estructuras singulares, como centrales nucleares, grandes puentes, etc.

Finalmente, en el documento RILEM AAR-7.2 se plantean los niveles de precaución y las medidas a aplicar para evitar la reacción carbonato-álcali. Solo dos medidas preventivas son aplicables para los niveles P2, P3 y P4:

- Medida preventiva – MCI: Identificar y evitar el uso de áridos potencialmente reactivos.
- Medida preventiva – MC2: Utilización de cementos con un elevado porcentaje de escorias de horno alto.

3.2. Prevención del ataque interno de sulfatos

Los sulfatos presentes en el hormigón, procedentes fundamentalmente del yeso añadido al cemento como regulador de fraguado, reaccionan generalmente durante las primeras etapas de la hidratación formando compuestos estables que no producen daños por expansión. No obstante, pueden producirse reacciones con sulfatos de otros orígenes en presencia de agua con el hormigón endurecido, formando compuestos expansivos que pueden inducir la formación de fisuras y la degradación del hormigón. Esto hace que sea necesario limitar la cantidad de sulfatos que aportan los materiales constituyentes del hormigón, especialmente los áridos, que puede generar un ataque interno por sulfatos (Parra, 2016).

3.2.1. Estrategia de prevención española – Instrucción EHE-08

Los sulfatos en los cementos comunes (UNE-EN 197-1) quedan regulados por el Pliego de Recepción de Cementos RC-16. En este Pliego se recoge que la cantidad máxima de sulfatos totales, expresado como SO_3 , tiene que ser $\leq 3,5\%$ a $\leq 4,0\%$, dependiendo del tipo de cemento. Para los cementos resistentes a sulfatos se establece una cantidad máxima de SO_3 , de $\leq 3,0\%$ o de $\leq 3,5\%$ y una cantidad máxima de C_3A de 0%, 3%, 5%, para los CEM I, o del 9% los cementos tipo CEM IV/A y B.

El azufre de los áridos puede proceder de sulfatos cálcicos o sulfatos alcalinos, y de sulfuros. Los sulfuros más potencialmente dañinos son las pirrotinas, que son sulfuros de hierro oxidables que pueden descomponerse, en presencia de oxígeno, liberando iones sulfatos que reaccionan con los aluminatos y el calcio presentes para formar compuestos expansivos. Los sulfatos pueden estar en los áridos como inclusiones de yeso, o combinados con álcalis (sulfatos sódicos y potásicos), si bien su presencia no es muy frecuente (Parra, 2016).

Para la prevención del ataque interno por sulfatos la EHE-08 recoge las limitaciones del contenido máximo de sulfatos solubles y de sulfatos totales en los áridos en los Apartados 28.7.2 y 28.7.3 respectivamente. El contenido de sulfatos solubles en ácido (expresados como SO_3) se limita al 0,8% en masa del árido, y los compuestos totales de azufre se limitan a un máximo del 1% en masa de la muestra para áridos gruesos y finos. Además, en el caso que se detecten sulfuros de hierro oxidables (principalmente pirrotina) la cantidad de sulfatos totales se limitará al 0,1% del peso total de la muestra. Además, como recomendación adicional, la EHE-08 establece que no es recomendable una diferencia entre sulfatos totales y solubles en ácido mayor del 0,25%, expresados ambos como SO_3 . Esto tiene por objeto limitar de forma indirecta el contenido total de los sulfuros oxidables.

De acuerdo con la normativa española, el contenido de sulfatos solubles en ácido (expresados como SO_3) se determina de acuerdo con el artículo 12 de la norma UNE-EN 1744-1; mientras que los compuestos totales de azufre se determinan de acuerdo con el artículo 11 de esta misma norma.

Por último, el agua debe cumplir la norma UNE-EN 1008 o ser agua potable.

3.2.2. Otras estrategias de prevención

En Europa se establecen varias categorías de áridos en función del contenido de sulfatos solubles en ácido, determinado de acuerdo con el artículo 12 de la norma UNE-EN 1744-1. Las categorías establecidas varían desde $\leq 0,2\%$ hasta $< 0,8\%$ en masa para los áridos que no corresponden a escorias de horno alto enfriadas al aire y áridos reciclados. También existe una clase en la que no se requiere un contenido máximo de sulfatos solubles en ácido, denominadas $\text{AS}_{\text{Declared}}$ o AS_{NR} respectivamente. Por su parte, en el caso de los compuestos totales de azufre, determinados de acuerdo con el apartado 11 de la norma EN 1744-1, se limita al 1% en masa para los áridos. Así mismo, se alerta sobre la importancia de limitar el contenido en sulfuros cuando estos están en forma de pirrotinas.

La norma ASTM C33 recoge los requerimientos generales para los áridos finos y gruesos a utilizar en el hormigón, si bien no recoge aspectos específicos para determinar los sulfatos presentes en los áridos. Sin embargo, en Reino Unido la norma BS 812-Part 118 se utiliza habitualmente para determinar los sulfatos solubles en ácido. Esta norma describe dos métodos de ensayo, uno para áridos utilizados como material de drenaje (p. ej. relleno de carreteras) y otro para áridos constituyentes de un material consolidado, como el hormigón o el mortero.

3.3. Bibliografía

- AASHTO PP 65-11 (2016) *Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction*. American Association of State and Highway Transportation Officials
- ACI PRC-221.1-98 (2008): *Report on Alkali-Aggregate Reactivity*. American Concrete Institute
- ACI PRC-221-96 (2001): *Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete*. American Concrete Institute
- ASTM C 1293 (2020) Standard test method for determination of length change due to alkali silica reaction. Annual Book of ASTM Standards. The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 6
- ASTM C1105-08a (2016): *Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction*. ASTM International
- ASTM C1260-22 (2022): *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. ASTM International
- ASTM C1293-20a (2020): *Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*. ASTM International
- ASTM C1567-22 (2022): *Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)*. ASTM International
- ASTM C295/C295M-19 (2019): *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. ASTM International
- ASTM C33/C33M-18 (2018): *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International
- ASTM C441/C441M-17 (2018): *Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction*. ASTM International
- ASTM C586-19 (2019): *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method)*. ASTM International
- Ayora C, Chinchón S, Aguado A, Guirado F. (1998) Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain, *Cement and Concrete Research* 28, pp.1223-1235
- Borchers, I. (2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-12: determination of binder combinations for non-reactive mix design or the resistance to alkali-silica reaction of concrete mixes using concrete prisms – 60 °C test method with alkali supply. *Mater Struct* 54, 202
- Borchers, I., Lindgård, J., Rønning, T.F. et al. (2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-11: determination of binder combinations for non-reactive mix design or the resistance to alkali-silica reaction of concrete mixes using concrete prisms – 60 °C test method. *Mater Struct* 54, 203
- BS 812-118 (2000): *Testing Aggregates Part 118: Method for Determination of Sulphate Content: Method for determination of sulphate content, Acid soluble sulphate SO_4^-* , British Standard Institution
- Chinchón-Payá S (2013) *Áridos reactivos en hormigones de presa. Reacción sulfática con formación de thaumasita*, Tesis Doctoral, Universidad de Alicante
- Chinchón-Payá, S., Aguado, A. and Chinchón, S. (2012): A comparative investigation of the degradation of pyrite and pyrrhotite under simulated laboratory conditions. *Engineering Geology*, **127**, pp. 75-80
- Chinchón-Payá, S., et al., 2011, *The sulfate attack in concrete by degradation of iron sulfides and the effect of the host rock*, in XII DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto
- Código Estructural (2021): MITMA. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio
- CRD-C 662-10 (2010): *Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials, Lithium Nitrate Admixture and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)*. US Army Corps of Engineers Materials Testing Center
- Especificación técnica ET 03.360.571.8 (2020): Traviesas monobloque de horion pretensado. Adif

- FD P18-456:2004 (2004): *Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance*. AFNOR
- FD P18-464:2014 (2014): *Béton - Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction*. AFNOR
- FD P18-542:2015 (2015): *Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction*, AFNOR
- Godard B, de Rooij MR, Wood JGM (2013) *Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures, Part 1 Diagnosis (AAR 6.1)*, RILEM state-of-the-Art Reports. Springer
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) (2008): Ministerio de Fomento. Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio
- Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16) (2016): Ministerio de Fomento. Real Decreto 256/2016, de 10 de junio
- Menéndez, E. (2018) *Manifestaciones externas de alteración por procesos físico-químicos en el hormigón por procesos físico-químicos en el hormigón de presas. Causas e identificación*. XI Jornadas Españolas de Presas, 26 al 29 de junio 2018, León, España, pp 997 – 1006, ISBN 84-89567-23-9
- Menéndez, E., *Estrategia integral de prevención de la reacción árido-álcali*, Monografía del IETcc N°430, Madrid, 2019. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ISBN: 978-84-00-10516-7
- Menéndez, E., Silva, A.S. & Duchesne, J. (2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-8: determination of potential releasable alkalis by aggregates in concrete. *Mater Struct* 54, 205
- NF P18-454:2004 (2004): *Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance*. AFNOR
- NF P18-594:2015 (2015): *Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis*. AFNOR
- Nixon PJ, Sims I (2016) *RILEM Recommendations for the prevention of damage by Alkali-Aggregate Reactions in new concrete structures*. RILEM state-of-the-Art Reports. Springer
- Oliveira, I., 2011a, (2011): Reacción Sulfática Interna en presas de hormigón. Cinética de comportamiento, in *Departament d'Enginyeria de la Construcció. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*, Barcelona. pp. 218
- Oliveira, I., et al (2013): New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. *Cement and Concrete Research*, 43: pp. 95-104
- Oliveira, I., et al., 2011b, (2011): Pyrrhotite oxidation kinetics: host rock influence and the effect of aggregate size on a concrete. *XIII International Congress on the Chemistry of Cement, XIII ICCO*. Madrid (Spain)
- Parra, J.L at al (2017): *Áridos para la fabricación del hormigón estructural*. ACHE
- RILEM AAR-1.1 (2016): RILEM Recommended Test Method: AAR-1.1—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Part 1: Petrographic Examination Method, in Nixon, P.J.; Sims, I. (editors), *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 35-60, Springer
- RILEM AAR-2 (2016): RILEM Recommended test method: AAR-2—Detection of potential alkali-reactivity. Accelerated mortar-bar test method for aggregates, in Nixon, P.J.; Sims, I. (editors), *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 61-77, Springer
- RILEM AAR-3 (2016) RILEM Recommended test method AAR-3—Detection of potential alkali-reactivity - 38°C. Test method for aggregate combinations using concrete prisms, in Nixon, P.J. and Sims, I. (editors), *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 79-97, Springer
- RILEM AAR-4.1 (2016) RILEM Recommended test method: AAR-4.1—Detection of potential alkali-reactivity - 60 °C test method for aggregate combinations using concrete prisms, in: Nixon, PJ, Sims, I (editors), *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 99-116, Springer
- RILEM AAR-5 (2016) RILEM Recommended Test Method: AAR-5—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates, in: Nixon, PJ, Sims, I (editors), *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 117-130, Springer

- RILEM AAR-7.1 (2016): RILEM Recommended Specification: AAR-7.1—International Specification to Minimise Damage from Alkali Reactions in Concrete—Part 1: Alkali-Silica Reaction, in: Nixon, PJ, Sims, I (editors), *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 131-145, Springer
- RILEM AAR-7.2 (2016) RILEM Recommended Specification: AAR-7.2 - International Specification to Minimise Damage from Alkali Reactions in Concrete—Part 2: Alkali-Carbonate Reaction, in Nixon, P.J. and Sims, I. (eds): *RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, RILEM State-of-the-Art Reports 17, pp. 147-153, Springer
- RILEM TC 106-2 (2000): Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - The ultra-accelerated mortar-bar test, *Materials and Structures*, 33, pp. 283-289
- RILEM TC 106-3 (2000): Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms, *Materials and Structures*, 33, pp. 283-289
- RILEM TC 106-AAR (2000): Alkali-aggregate reaction, *Materials and Structures*, 33, pp. 283-283
- Rønning, T.F., Wigum, B.J., Lindgård, J. (2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-10: determination of binder combinations for non-reactive mix design using concrete prisms–38 °C test method. *Mater Struct* 54, 204
- Rønning, T.F., Wigum, B.J., Lindgård, J. et al. (2022): Correction to: Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-0 outline guide to the use of RILEM methods in the assessment of the alkali-reactivity potential of concrete. *Mater Struct* 55, 114
- Rønning, T.F., Wigum, B.J., Lindgård, J. et al.(2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-0 outline guide to the use of RILEM methods in the assessment of the alkali-reactivity potential of concrete. *Mater Struct* 54, 206
- UNE 146508:2018 (2018): *Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero.* UNE
- UNE 146509:2018 (2018): *Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos. Método de los prismas de hormigón.* UNE
- UNE 146512:2018 (2018): *Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato.* UNE
- UNE 146513:2018 (2018): *Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Determinación de la reactividad álcali-carbonato.* UNE
- UNE 83967:2016 EX (2016): *Durabilidad del hormigón. Método de ensayo para evaluación de la expansión potencial por reacción árido-álcali de dosificaciones de hormigón. Método semiacelerado de prismas de hormigón.* UNE
- UNE 83968:2016 EX (2016): *Durabilidad del hormigón. Evaluación de la expansión de probetas de mortero utilizando mezclas de áridos potencialmente reactivos y no reactivos, frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato. Método acelerado en probetas de mortero.* UNE
- UNE 83969:2017 EX (2017): *Durabilidad del hormigón. Evaluación de la expansión en probetas de mortero empleando conglomerantes y áridos potencialmente reactivos frente a la reacción álcali-sílice y álcali-silicato. Método acelerado en probetas de mortero.* UNE
- UNE-EN 1008:2007 (2007): *Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos de evaluación y aptitud al uso incluyendo las aguas de lavado de las instalaciones de reciclado de la industria del hormigón, así como el agua de amasado para hormigón.* UNE
- UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013 (2013): *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.* UNE
- UNE-EN 197-1:2011 (2011): *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.* UNE
- UNE-EN 932-3/A1:2004 (2004): *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 3: Procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada.* UNE
- XP P18-544 (2015): *Granulats - Determination des alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux.* AFNOR

Yamada, K., Kawabata, Y., de Rooij, M.R. et al. (2021): Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing to assess the expansion potential of alkali-silica reaction. *Mater Struct* 54, 201

4. Detección

En el presente capítulo se pretende describir las actuaciones a llevar a cabo de manera preventiva, con el objetivo de comprobar un correcto estado de la presa y de detectar, llegado el caso, cualquier fenómeno que pueda influir negativamente en su seguridad.

Una fuente de información de importancia inestimable sobre el aspecto de la presa y de sus inmediaciones la constituye las inspecciones visuales. Estas visitas, realizadas periódicamente por el mismo equipo de personas, proporciona una idea de la evolución del estado de los materiales de la presa y de la cimentación, de especial importancia en el caso de obras antiguas en que las prestaciones de los materiales pueden ser dudosas y las condiciones de ejecución no son bien conocidas.

No obstante, estos reconocimientos visuales son insuficientes para cubrir los requisitos de seguridad de la estructura, no solo porque no pueden llegar a zonas ocultas, sino porque la percepción del ojo humano es inferior a la exigida para detectar fenómenos de pequeña cuantía. Esta carencia hace necesaria la instalación de sistemas específicos de instrumentación que, por su sensibilidad, sean capaces de proporcionar datos con precisiones adecuadas para una correcta caracterización numérica del comportamiento de la presa.

Con las razones expuestas en el párrafo anterior, queda justificada la necesidad y complementariedad de la realización de inspecciones visuales y del análisis de los datos proporcionados por los sistemas de auscultación instalados.

4.1. Inspecciones visuales

Las manifestaciones que la expansión química del hormigón origina en la presa están condicionadas tanto por la heterogeneidad de la distribución del fenómeno en la masa de hormigón, como por la acción de las coacciones a las que está sometida la estructura. Generalmente estas manifestaciones pueden ser detectadas a simple vista, por lo que es esencial que la inspección visual que se realice no tenga carácter pasivo, sino que se efectúe periódicamente (recomendable al menos trimestralmente) y de una manera planificada, basada en el uso de una guía de puntos a observar convenientemente preparada y particularizada para cada instalación, y con el objetivo de detectar las anomalías que en muchos casos no se ponen de manifiesto mediante la instrumentación.

Es fundamental, por todo lo anterior, que sean siempre los mismos equipos de personas los que realicen las inspecciones visuales. Estos equipos deben estar formados por personas convenientemente sensibilizadas con la importancia de las inspecciones visuales dentro de las actividades de auscultación, y formadas específicamente, aunque a un nivel básico, en la amplia variedad de manifestaciones que el fenómeno químico de expansión del hormigón puede producir en la estructura. Una vez se tenga la sospecha de una posible afección de esta índole, serán necesarias una o varias inspecciones más detalladas y especializadas, realizadas

por profesionales expertos en esta patología, con la finalidad de realizar un diagnóstico adecuado.

A continuación, se detallan las manifestaciones más llamativas que la expansión química del hormigón suele provocar en presas construidas con este material, fácilmente detectables mediante las inspecciones visuales periódicas a la presa y a sus inmediaciones.

1. **Fisuración:** La fisuración es el efecto resultante de esta patología más perceptible al ojo humano y, en ocasiones, alarmante. No obstante, se ha constatado que en las presas dicha fisuración se disipa generalmente dentro del primer metro desde la superficie, lo que no compromete la seguridad del cuerpo de presa. Sin embargo, en ciertos elementos de espesores reducidos, especialmente cuando están sometidos a sollicitaciones importantes (por ejemplo, pilas, cajeros y rápidas de aliviaderos), podría llegar a ser problemática. Adicionalmente, la abertura de esas mismas fisuras puede servir de caminos preferenciales para el transporte de reactivos y favorece la formación de productos de reacción, con la consecuente aceleración de los procesos de deterioro del hormigón.

La característica fundamental de la fisuración debida a la expansión química es su ramificación en el caso de elementos de hormigón en masa sin restricciones o con coacciones reducidas, o su orientación definida si se trata de zonas armadas o con tensiones preferenciales en una dirección.

La coronación, los paramentos y los aliviaderos son zonas extensas y poco solicitadas donde fácilmente pueden observarse evidencias de la fisuración ramificada, ya que tienen mayor exposición al agua y a la acción meteorológica; en ocasiones también puede observarse en el paramento de aguas arriba cuando el nivel del embalse lo permite. En las Figuras 4.1 a 4.3 se observan las manifestaciones citadas.

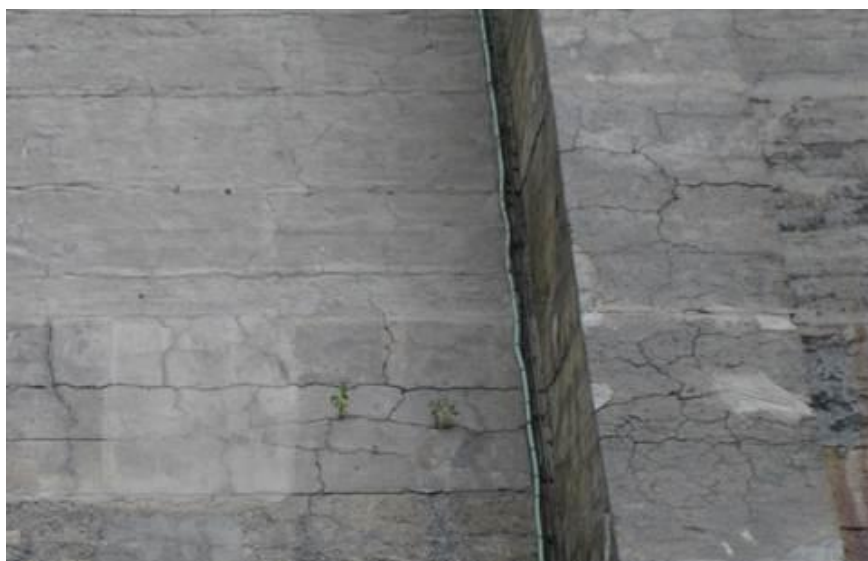


Figura 4.1. Fisuras en el paramento de aguas abajo (cortesía UPC)



Figura 4.2. Fisuración ramificada en el paramento de aguas abajo (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.3. Fisuración ramificada en coronación (cortesía de Iberdrola)

Una observación habitual en las obras hidráulicas es la aparición de depósitos alargados de color blanco en la superficie del hormigón, que corresponden a carbonatos cálcicos. Estos carbonatos se forman como consecuencia de la carbonatación de la portlandita lixiviada de la pasta cementante por la acción del agua que atraviesa el hormigón debido a la presión hidráulica. El agua puede circular, bien por la red porosa o bien por las fisuras u oquedades del hormigón, haciendo que se formen depósitos de portlandita en la superficie, que se carbonata debido a la acción del CO_2 ambiental. Estos depósitos de calcita pueden localizarse en las fisuras, ocasionadas por la reacción árido-álcali, enmascarando el aspecto de los geles, tal y como se observa en las Figuras 4.4 y 4.5. En estos casos se debe recurrir al análisis microestructural del hormigón, con el fin de identificar de forma adecuada la presencia de productos de reacción.



Figura 4.4. Fisuración ramificada con productos de RAS y depósitos de carbonato cálcico (cortesía UPC)



Figura 4.5. Fisuración ramificada con productos de AIS y depósitos de carbonato cálcico colmatando las fisuras (cortesía UPC)

En el caso de la RAS es típico que las fisuras presenten un cambio de tonalidad del hormigón en sus bordes (generalmente con decoloración inicial) que puede ir acompañada de exudaciones de geles en algunas zonas. Estas exudaciones suelen ser anaranjadas, amarillentas o blanquecinas, y corresponden a las zonas donde las reacciones internas han producido la migración de geles a la superficie.

Los depósitos en torno a las fisuras ramificadas pueden tomar una coloración diferente dependiendo de distintos aspectos, como el tipo de árido, el tipo de cemento, la carbonatación superficial del hormigón, la presencia de colonización biológica del hormigón, etc. Mayoritariamente se observan depósitos de color grisáceo, pero en caso de que los áridos tengan un contenido significativo de hierro, puede observarse que el gel exuda con una coloración anaranjada (Figuras 4.6 y 4.7).



Figura 4.6. Exudación de geles anaranjada debido a la presencia de hierro en los áridos (cortesía IETcc)



Figura 4.7. Exudación de geles anaranjada debido a la presencia de hierro en los áridos (cortesía de E. Menéndez)

Por otra parte, cuando la superficie del hormigón está carbonatada y dependiendo del tipo de cemento utilizado, esta superficie tiene una coloración muy clara (prácticamente blanca) y los geles y exudaciones aparecen con una coloración oscura en torno a los bordes de las fisuras (Figura 4.8).



Figura 4.8. Exudación de geles en superficie de hormigón carbonatado (cortesía E. Menéndez)

Cuando hay una colonización biológica en la superficie del hormigón (muy habitual en zonas lluviosas y en superficies horizontales, como aceras, pavimentos o pretilas) la coloración de esta superficie suele ser muy oscura, observándose nódulos de colonias de color negro cuando se examina el hormigón por estereomicroscopía. En este caso la alcalinidad de los geles que exudan por las fisuras degrada las formaciones biológicas existentes e inhibe la progresión de la colonización, resultando una coloración muy clara en los bordes de las fisuras (Figuras 4.9 y 4.10).



Figura 4.9. Exudación de geles en superficie de hormigón inhibiendo la colonización biológica (cortesía de Iberdrola y E. Menéndez)



Figura 4.10. Exudación de geles en superficie de hormigón inhibiendo la colonización biológica (cortesía UPC)

En la retícula formada por las fisuras se puede inscribir un círculo, tal como se muestra en la Figura 4.11, y obtener un radio (r) medio de una zona. Usualmente este radio medio es menor en reacciones tipo AIS que en las correspondientes a las reacciones tipo RAS. Ello obedece a que las deformaciones unitarias suelen ser mayores y concentran tensiones alrededor de los áridos gruesos, frente al conjunto de la masa que se produce en las reacciones RAS.



Figura 4.11. Círculo inscrito en retícula de fisuras en mapa (cortesía UPC)

Otra diferencia en la fisuración típica de ambos tipos de reacción radica en que la AIS suele originar unas fisuras más abiertas, del orden de unidades de mm (Figura 4.12), aunque de menor profundidad. Esa anchura de fisura es variable en función de las sollicitaciones exteriores (peso propio, empuje hidrostático, etc..) y, consecuentemente, serán más visibles

en zonas con pocas solicitaciones, tales como: tajamares, muretes guías de aliviaderos, dientes de pie de presa, etc.

Los bordes de estas fisuras suelen tener un color ocre debido a la oxidación previa de los sulfuros presentes en los áridos y normalmente no van acompañadas de depósitos en superficie, aunque sí en el interior de la masa de hormigón.

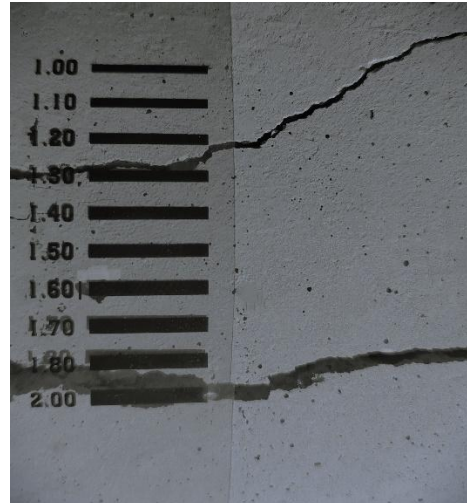


Figura 4.12. Ancho de fisura de 2 mm, con bordes limpios (cortesía de IETcc)

2. Pérdida de material: En ocasiones puede haber pérdidas de material en la superficie del hormigón que inicialmente afectan a las capas superficiales pero que progresivamente van penetrando en capas más profundas. En las zonas donde se ha producido el desprendimiento del material pueden aparecer geles o depósitos blancos (Figura 4.13 y 4.14).

En el caso de hormigones expuestos a la intemperie, es de especial interés prestar atención a la presencia de colonizaciones biológicas en toda la superficie excepto en las inmediaciones de las fisuras ramificadas, donde desaparece a consecuencia de la presencia de los geles producto de la reacción química (*vid. supra*, Fisuración).



Figura 4.13. Presencia de colonizaciones en un murete de coronación (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.14. Pérdida de material en el paramento de aguas abajo (cortesía de Iberdrola)

3. Filtraciones: Otra manifestación del fenómeno de expansión química en presas es la aparición de filtraciones en determinadas zonas de las juntas horizontales entre tongadas debido a despegues ocasionados por la reacción química (Figura 4.15). Este deterioro suele aparecer en la parte superior de la presa, ya que soporta un menor peso y sus confinamientos laterales son menores, y a menudo se hace visible en el interior de los pozos (Figura 4.16). Es frecuente que en dichas zonas se formen depósitos de color blanco, que deslizan por las paredes, y que corresponden a depósitos de carbonato cálcico formados por la lixiviación de la portlandita (Figura 4.4). Como se ha explicado anteriormente, estos depósitos pueden enmascarar o colmatar las fisuras ramificadas producidas como consecuencia de las reacciones expansivas.



Figura 4.15. Filtraciones entre tongadas (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.16. Filtraciones en el interior del pozo (cortesía de Iberdrola)

4. Defectos en galerías y pozos: Durante la inspección visual en el interior de la presa, es importante observar la superficie del hormigón en pozos y galerías. Estas suelen presentar fisuras cuasi-horizontales secas en el hastial de aguas abajo (Figura 4.17) y frecuentemente con filtraciones aguas arriba (Figura 4.18), y longitudinales en la bóveda (Figura 4.19), llegando a adquirir una inclinación fácilmente observable a simple vista en los tramos de galería más cercanos a los estribos. Este modelo de fisuración se asocia a las fuertes tracciones provocadas por los cambios volumétricos del hormigón en contacto directo con agua, aguas arriba de la galería, reforzados por la expansión que tiene lugar en sentido transversal y que se encuentra coaccionada por los estribos en ambas márgenes.

La fisuración ramificada que pueden presentar los pozos también es un síntoma claro de la afección en el interior de la presa, tal y como se ve en la Figura 4.20. Esas fisuras se pueden producir por cotas superiores a la máxima del embalse y son consecuencia del agua aportada, exteriormente, por la lluvia.



Figura 4.17. Fisura en el hastial de aguas abajo de una galería (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.18. Fisura en el hastial de aguas arriba de una galería (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.19. Fisura en la clave de una galería (cortesía de A. Aguado)



Figura 4.20. Fisuración en un pozo (cortesía de Iberdrola)

5. **Desplazamiento diferencial entre elementos contiguos:** Una de las manifestaciones que pueden detectarse fácilmente durante las inspecciones visuales es la desalineación de elementos; en ocasiones las juntas de estos elementos pueden abrirse mientras que en otras pueden cerrarse llegando incluso a la rotura del material circundante. Este fenómeno es claramente visible en los pretiles, barandillas y otros elementos lineales en la coronación de presa tal y como se muestra en las Figuras 4.21 a 4.26.



Figura 4.21. Desalineación entre bloques en coronación (cortesía IETcc)



Figura 4.22. Rotura de hormigón en coronación (cortesía de Iberdrola)



Figuras 4.23 y 4.24. Abertura de juntas entre tramos de pretil en alzado y en planta (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.25. Desalineación en pretil de coronación con rotura del raíl (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.26. Desalineaciones en la barandilla de coronación (cortesía de Iberdrola)

6. Restricciones en la operatividad de elementos mecánicos e hidromecánicos: En numerosas ocasiones, el fenómeno de expansión química en presas da lugar a una deformación de la geometría original de los aliviaderos que produce restricciones en la movilidad de las compuertas u otros elementos metálicos. Es frecuente la presencia de estrechamiento de las ranuras por las que discurren las compuertas y cambios en la alineación de sus ejes. Con el tiempo, estas manifestaciones suelen provocar la necesidad de acometer una actuación sobre dichos elementos para poder restituir su operatividad normal, cuestión fundamental en materia de seguridad tanto de la presa como de terceros.

En las Figuras 4.27 y 4.28 se observa la fisuración enramada en el hormigón de un aliviadero con compuertas.



Figura 4.27. Fisuración en la pila del aliviadero con compuerta (cortesía de E. Menéndez)



Figura 4.28. Fisuración en una estructura auxiliar de compuerta (cortesía de Iberdrola)

En caso de existir ascensor en la presa la expansión diferencial entre elementos puede detectarse durante las inspecciones visuales por: desalineaciones de las puertas del ascensor, problemas en su apertura o cierre, mal funcionamiento durante el descenso o

ascenso de la cabina, rozamiento con los carriles del pozo e incluso rotura de alguna de las guías por las que se mueve la cabina. En la Figura 4.29 se muestra la rotura de las guías de un ascensor en una presa con expansión química.

Otra manifestación de la expansión en la presa puede ser la rotura de elementos metálicos ubicados en coronación, que pueden llegar a ocasionar restricciones importantes de movilidad que dificulte, e incluso impida, la operación normal de equipos mecánicos. En la Figura 4.30 se observa la rotura de un carril de un puente grúa.



Figuras 4.29 y 4.30. Rotura de las guías de un ascensor de presa y de un carril de un puente grúa en coronación (cortesía de Iberdrola)

En ocasiones los movimientos remanentes que produce la reacción expansiva afectan también a la operatividad de elementos metálicos fijos, como tapas de pozos o carcasas metálicas, que, si bien pueden no suponer un problema grave, sí que pueden constituir un signo claro de la presencia de esta patología.

Y, por último, el fenómeno de expansión puede manifestarse mediante otros efectos de gran importancia para la explotación, como: desalineación en los ejes de las turbinas, contacto de las partes móviles con el hormigón cercano y aumento de la vibración o el ruido.

7. Interacción terreno-estructura: Durante la inspección visual de la presa, es aconsejable analizar los estribos con el fin de identificar posibles discontinuidades geológicas susceptibles de generar movimientos y productos que sugieran presencia de minerales potencialmente alterables. En este último caso, la degradación de la roca es fácilmente detectable, si bien la ausencia de evidencias no implica la inexistencia de dichos minerales. En las Figuras 4.31 y 4.32 se presentan estribos de dos presas diferentes donde se observan coloraciones típicas de la oxidación de los sulfuros de hierro. Este fenómeno puede conducir a una expansión de los estribos y, en consecuencia, la generación de tensiones en la presa.



Figuras 4.31 y 4.32. Evidencias de oxidación de sulfuros de hierro en la roca de los estribos (cortesía A. Aguado)

Evidencias de ello son la presencia de fisuras longitudinales con cierta inclinación en zonas cercanas a coronación de la presa, habitualmente por encima de cota del embalse. En general, el ángulo con respecto a la horizontal de estas fisuras puede oscilar entre 0° y 45° en función de la inclinación existente entre el contacto presa-terreno. La Figura 4.33 muestra esquemáticamente el fenómeno descrito: la expansión de los estribos, menos constreñida en la parte superior y representada mediante estrellitas, iniciaría la fisuración del hormigón en el contacto entre ambos materiales cuando su magnitud superase los límites de tracción del hormigón, sin apenas compresión vertical en esas zonas altas.

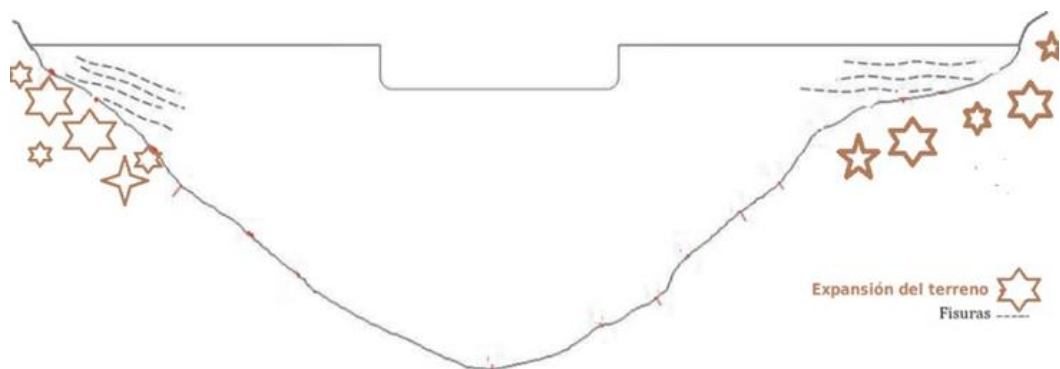


Figura 4.33 Representación teórica de empujes y fisuras (Pardo, 2014)

La Figura 4.34 ilustra un ejemplo de este fenómeno en una presa de gravedad con estribos expansivos y los resultados de un modelo numérico que incluye juntas sub-horizontales sin

espesor en el hormigón que, a causa del poco peso suprayacente y el arrastre y dilatación tangencial en la interfase inducido por la expansión del terreno, reproduce la fisuración.

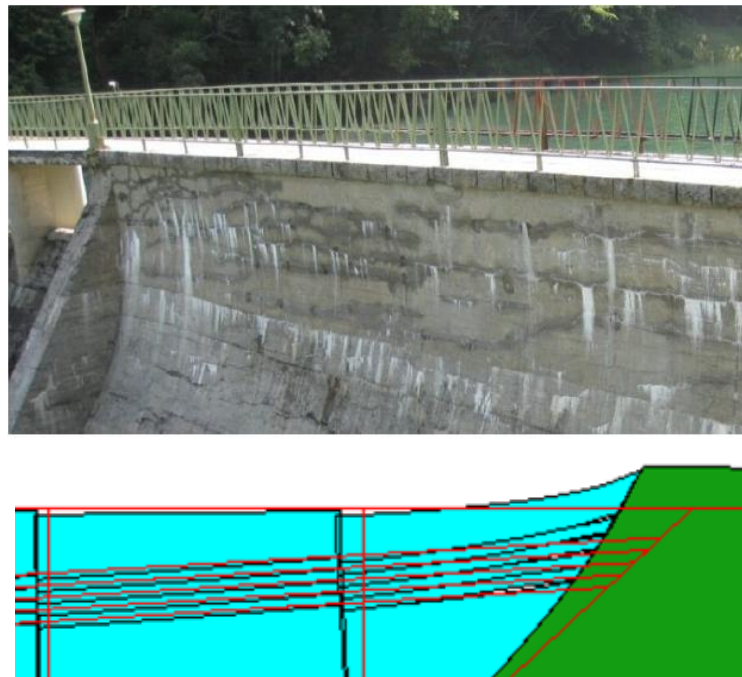


Figura 4.34. Detalle de fisuras horizontales (cortesía A. Aguado) y su representación teórica (Pardo, 2014)

Una manifestación común a todas las presas de hormigón afectadas por procesos expansivos son los movimientos de carácter no recuperable. Evidentemente, dichos movimientos no son apreciables de manera directa durante las inspecciones visuales, sino que se detectan como tendencias en las series históricas de movimientos registradas a lo largo de los años, con sus valores máximos en puntos de la coronación.

Independientemente de la tipología de la presa, la componente vertical de esos movimientos irreversibles es siempre hacia arriba: es el resultado de la integración de las deformaciones volumétricas de la masa que no encuentran coacción, en general, en esa dirección. Se puede producir una coacción parcial del movimiento vertical cuando hay una diferencia considerable de altura entre bloques contiguos y con juntas bien cerradas, de manera que el de mayor altura tiende a arrastrar al de menor produciéndose un esfuerzo rasante vertical entre ambos que puede dar lugar a fisuración inclinada cerca de los bordes de contacto.

La componente horizontal del movimiento está mucho más condicionada por la tipología: en presas curvas el aumento de longitud de los arcos que impone la expansión da lugar necesariamente a movimiento radial hacia el embalse, especialmente en presas de doble curvatura, de mucho menos espesor con relación a la altura. En presas de simple curvatura, particularmente en las denominadas arco-gravedad, la variación de espesores, consecuencia de la diferente inclinación de los dos paramentos, y las distintas condiciones de temperatura y humedad de estos, puede dar lugar en ocasiones -aunque es realmente infrecuente- a movimientos hacia el valle.

En presas de gravedad los movimientos horizontales permanentes se producen tanto hacia el embalse como hacia el valle, dependiendo de la expansión diferencial entre ambos paramentos: a igualdad de expansión unitaria, el movimiento resultante de la coronación tendería hacia el embalse, al ser el paramento yuso de más longitud. Sin embargo, el anterior esquema puede ser alterado cuando la expansión unitaria sea suficientemente mayor en el paramento mojado, ya sea por la influencia en la reacción expansiva de la mayor humedad o como consecuencia de la diferente temperatura permanente entre ambos debido a la orientación de la presa. Algunos autores han analizado (Amberg, 2017) la gran influencia de la insolación en el sentido del movimiento horizontal en presas alpinas, de manera que solo aquéllas con el paramento de aguas abajo hacia el Norte (entre el NW y NE) tenían movimientos hacia aguas abajo.

En presas aligeradas o de contrafuertes son aplicables los mismos esquemas de movimiento que los descritos para las de gravedad, pero con la diferencia de que las diferencias térmicas e higroscópicas son aún mayores por la falta de continuidad entre los paramentos. Por otro lado, no suele haber tanta diferencia en la inclinación de los paramentos (son más simétricos respecto a la vertical), lo que lleva a que sus longitudes sean más parejas y, por tanto, prevalezcan los movimientos hacia aguas abajo al ser más probable la mayor expansión del paramento mojado. Además, el mecanismo de compatibilidad de deformaciones se ve también afectado por la rigidez relativa de los distintos componentes estructurales en las de contrafuertes.

Teniendo en cuenta lo anterior, las manifestaciones de este fenómeno que pueden detectarse durante las inspecciones visuales de las presas que sufren expansión química pueden enumerarse dependiendo de la tipología de la presa según se indica a continuación, en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resumen de manifestaciones usuales en presas como consecuencias de reacciones expansivas.

Manifestaciones específicas	Presas de gravedad		Presas arco	
	Macizas	Aligeradas o de contrafuertes	De doble curvatura o bóvedas	De curvatura simple
Deformación progresiva en coronación (elevación y en el plano horizontal)	X	X	X	X
Desalineaciones de bloques	X	X	---	X
Cierre / abertura de juntas	X	---	Abertura en la zona superior	X
Fisuración	X En pozos y galerías	X Horizontal En almas de contrafuertes	X Paralelas al cimiento en el paramento de aguas abajo	X En pozos y galerías
Deslizamiento cuasi-horizontal en la cimentación cercana a los estribos	X	---	---	X
Expansión acentuada en zonas específicas	---	X En las cabezas de los contrafuertes	---	---
Debilitamiento de uniones entre tongadas	---	---	X	---

Además de lo anterior, existe la posibilidad que a lo largo del periodo de construcción de la presa la dosificación y/o composición del hormigón sufriera variaciones, lo que complica aún más la previsión de movimientos de la estructura, especialmente si no se dispone de documentación histórica que lo avale y aporte información. Si se observan síntomas de esta patología en diferentes zonas, existe una alta probabilidad de que el fenómeno de expansión sea generalizado.

Sin embargo, es posible que se manifieste en determinadas áreas de la presa, lo que podría inducir a pensar que se trata de un fenómeno localizado. Así, por ejemplo, en la Figura 4.35 se muestra una misma galería (el mismo emplazamiento), ubicada en dos bloques diferentes, con hormigones procedentes de dos canteras diferentes. En ella se observa una zona con hormigones expansivos y la otra sin problema alguno de expansiones.



Figura 4.35. Efectos locales de un mismo emplazamiento (cortesía A. Aguado)

Es importante destacar que las inspecciones visuales no deben restringirse únicamente a la presa. Ante la sospecha de una posible afección por expansión química del hormigón en la estructura puede ser útil una visita a la cantera de procedencia de los áridos para observar

su posible alteración a nivel superficial por efecto de la exposición al ambiente. Si algún frente de cantera presenta alteración puede indicar una potencial reactividad de los áridos. Además, se pueden extraer muestras de árido, de la zona no meteorizada, con el fin de caracterizar la potencial reactividad de los áridos. Por tanto, es conveniente realizar la inspección en todos los frentes de la cantera por si alguno presenta alteraciones (Figuras 4.36 y 4.37).



Figuras 4.36 y 4.37. Frente de una cantera con árido reactivo (cortesía A. Aguado)

Asimismo, durante las inspecciones visuales resulta gran utilidad incluir la visita a las estructuras auxiliares coetáneas, ya que por sus características geométricas o estructurales pueden manifestar signos típicos de esta anomalía de una forma más acusada (Figuras 4.38 a 4.41). Esto puede ser de ayuda para identificar el origen del daño. No obstante, hay que tener en cuenta que la inexistencia de fisuración en estructuras anejas no descarta la presencia de expansión química en la presa, la cual está permanentemente en contacto con el agua y sometida a un estado tensional diferente.



Figuras 4.38 y 4.39. Fisuración en estructuras anejas (cortesía de Iberdrola)



Figuras 4.40 y 4.41. Fisuración en estructuras anejas (cortesía de Iberdrola)

Una vez confirmada la presencia de expansión química en la presa, es importante complementar las inspecciones visuales, cualitativas, con dispositivos de auscultación específica que permitan cuantificar el fenómeno. En el apartado 4.3 *Sistemas de auscultación para detección* se describen los dispositivos utilizados para la detección y caracterización de los desplazamientos tanto verticales como horizontales, así como el sentido de estos movimientos en función de la tipología de presa.

De acuerdo con lo mencionado en este apartado, queda suficientemente justificada la conveniencia de efectuar inspecciones visuales periódicas de la presa atendiendo a la aparición de nuevos defectos y a la evolución de los detectados anteriormente. La ausencia de sofisticación en este tipo de observación no debe ser motivo para su infravaloración, máxime cuando permite descubrir anomalías que en algunos casos no son detectables por otros sistemas de control o auscultación. Una inspección detallada de la presa junto con las inspecciones realizadas anteriormente y el patrón de defectos típicos definidos en este capítulo, pueden constituir el punto de partida para la detección y estudio de la evolución de esta patología en la estructura.

4.2. Efectos de envejecimiento principales en presas, aspectos macro, meso y microestructurales

Los principales daños asociados al envejecimiento del hormigón, debido a reacciones en el material que generan daño son la lixiviación, la reacción álcali-sílice, el ataque interno de sulfatos, el ataque externo por sulfatos, el hielo-deshielo y la corrosión.

Estos fenómenos tienen características específicas a nivel macroestructural, mesoestructural y microestructural. Debido a la forma de las grietas, la pérdida de material y los depósitos formados, se puede reconocer o sospechar algún tipo de daño.

Cada tipo de daño tiene características diferentes, un ejemplo de estas patologías se recogen a continuación. En la Figura 4.42 se muestran algunos ejemplos del aspecto macro, meso y microestructural de diferentes patologías del hormigón en presas, con el aspecto típico de cada daño.

SÍNTOMAS DE ALTERACIÓN

MACRO

MESO

MICRO

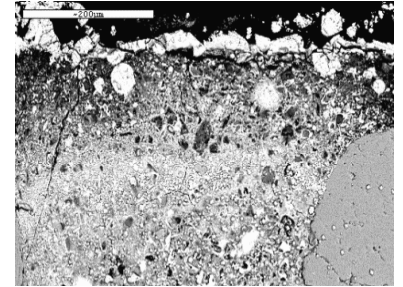
Lixiviación (ataque ácido débil)



(a) Proyecto Horex 2011



(b) Proyecto Horex 2011



(c) Proyecto Toulouse 2009

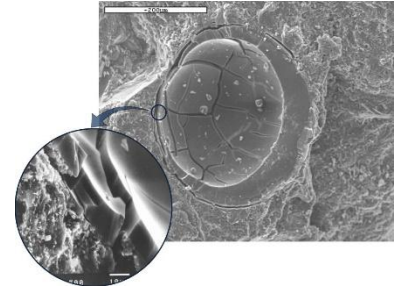
Reacción alcali-sílice (RAS)



(d) Fontana, Valle Tennessee 2012



(e) Presa de San Esteban 2018



(f) Presa de San Esteban 2018

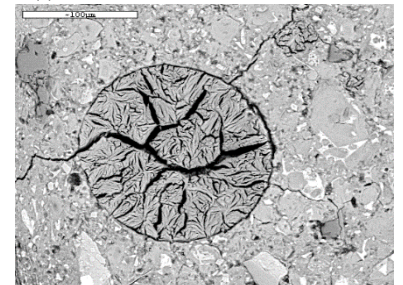
Ataque interno por sulfatos (AIS)



(g) Presa de Graus 2016



(h) Presa de Graus 2016

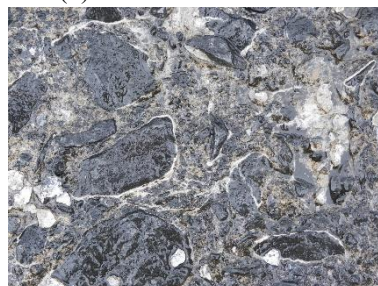


(i) Ataque interno por sulfatos

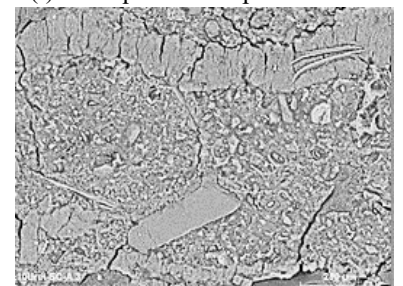
Ataque externo por sulfatos (AES)



(j) Presa de Santeetlah (Atlanta) 2013



(k) Presa de Santeetlah (Atlanta) 2013



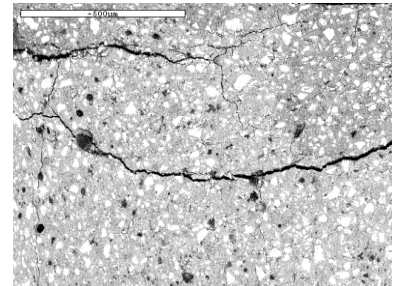
(l) Cristalizaciones de etringita 2012

**SÍNTOMAS
DE
ALTERACIÓN**
MACRO
MESO
MICRO
Hielo-deshielo


(m) Presa de Manzanares 2021



(n) Presa de Manzanares 2021



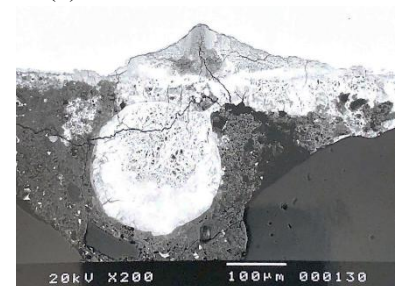
(o) Mortero con helada. 2016

Corrosión


(p) Puente con corrosión 2019



(q) Puente con corrosión 2019



(r) Interfase acero-óxido

Figura 4.42. Aspecto macroestructural, mesoestructural y microestructural de diferentes patologías: lixiviación, reacción álcali-silíce, ataque interno por sulfatos, ataque externo por sulfatos, hielo-deshielo y corrosión (cortesía E. Menéndez).

- **Lixiviación (ataque ácido débil):** Corresponden a procesos de descalcificación debido a fallos en juntas, agua filtrante o contacto permanente con agua. Se caracteriza por la aparición de eflorescencias blancas o con alguna coloración naranja o rojiza, que se deben a la migración de hierro u otros elementos cromóforos arrastrados junto al calcio de la portlandita:
 - (a) *Imagen macroscópica*, descalcificación debido a filtraciones por las juntas, en el interior de galería troncopiramidal de la presa de Ullibarri. (Menéndez, 2008-2010)
 - (b) *Imagen mesoscópica*, detalle de depósitos y estalactitas formadas por la lixiviación de portlandita desde el hormigón. También se observan depósitos de color naranja o rojizos, esta coloración es debida al arrastre de iones de hierro desde de determinados tipos de áridos o de las armaduras oxidadas (Menéndez, 2008-2010)
 - (c) *Imagen microscópica*, aspecto microestructural de un hormigón en contacto permanente con agua filtrante. Se observa una acumulación de calcio a pocos nanómetros de la superficie, un aumento de porosidad en la superficie del hormigón y la formación de depósitos de carbonatos cálcicos justo en la superficie externa. Esta formación de depósitos se produce por el contacto de la portlandita lixiviada con el anhídrido carbónico ambiental. BSE-EDX (Menéndez, 2003-2005)

- **Reacción álcali-silíce:** Esta es una reacción expansiva que se produce en el hormigón debido a la formación de productos expansivos. En estas reacciones expansivas los

áridos con sílice amorfa o poco cristalina en presencia de álcalis libres y agua forman geles y productos microcristalinos, que aumentan de volumen e inducen la formación de fisuras. Las fisuras tienen un aspecto ramificado, sin seguir un patrón de fisuración concreto.

- (d) *Imagen macroscópica*, hormigón de presa con una fisuración ramificada muy significativa debido a la expansión por la formación de productos de reacción expansivos. También se observan algunos depósitos blancos, asociados con fenómenos de lixiviación (Menéndez, 2013a)
 - (e) *Imagen mesoscópica*, fisuración ramificada con decoloración en torno a las fisuras. Esta decoloración es debido a la exudación de geles en la superficie con elevado pH (Menéndez, 2010)
 - (f) *Imagen microscópica*, imagen de geles vítreos, vistos por microscopía electrónica de barrido, depositados en el interior de poros de aire. Los poros actúan como cámaras de expansión donde se depositan los geles expansivos cuando migran desde los áridos a la pasta cementante. SEM-EDX (Menéndez, 2010)
- **Ataque interno por sulfatos:** El ataque interno por sulfatos puede estar asociados a dos tipos de fenómenos, formación de etringita diferida o alteración de piritas o pirrotinas que están como inclusión en los áridos. En ambos casos se produce la formación de etringita que se forman en el interior de poros, en interfaces árido-pasta o en la pasta cementante y pueden producir fisuración. Normalmente se produce la formación de etringita en poros, interfases árido-pasta y en huecos de la pasta cementante. Si estas cristalizaciones inducen la formación de fisuras se produce una expansión asociada. Si el fenómeno producido es etringita diferida, la etringita puede recristalizar en huecos previamente formados, debido al aumento de temperatura, durante el proceso de hidratación.
 - (g) *Imagen macroscópica*, Presa de Graus (imagen de www.wikipedia.org) con ataque interno por sulfatos debido a la oxidación de pirrotinas, formación de fisuración ramificada.
 - (h) *Imagen mesoscópica*, Fisuración ramificada con coloración naranja-ocre y partículas oxidadas de pirrotinas, que generan la formación de microfisuras ramificadas sin orientación preferente (Menéndez, 2010).
 - (i) *Imagen microscópica*, Poro completamente relleno de etringita e induciendo la formación de fisuras. BSE-EDX (Menéndez, 2010).
 - **Ataque externo por sulfatos:** El ataque externo se produce desde el exterior, pero los sulfatos no se quedan solo en la superficie, sino que también se produce una penetración de los sulfatos hacia el interior y suele producir la formación de etringita en el interior. Sin embargo, la manifestación externa habitual de esta alteración es la descamación superficial, por la formación de productos expansivos fundamentalmente en las interfases árido-pasta y en la pasta cementante. Si los iones, que acompañan a los sulfatos, son diferentes del calcio se producen cristalizaciones de sulfatos de sodio, sulfatos cálcicos, sulfatos magnésicos, etc. En cuanto al patrón de fisuración es más bien paralelo a la superficie de exposición con la pérdida progresiva de material a la vez que expansión.
 - (j) *Imagen macroscópica*, Presa con fisuración paralela y delaminación (Menéndez, 2013b)

- (k) *Imagen mesoscópica*, Descamación superficial en coronación de presa. Se observan depósitos blancos en torno a los áridos con formación de yeso secundario (Menéndez, 2013b)
- (l) *Imagen microscópica*, Cristalizaciones de etringita en el interior de hormigón con ataque externo por sulfatos (Menéndez, 2009)
- **Hielo-deshielo:** Las temperaturas inferiores a 0 °C producen la congelación del agua de la disolución de los poros con el consiguiente aumento de volumen, lo que produce una expansión asociada. El fenómeno puede ser muy complejo, si se produce en presencia de sales de deshielo, pero eso generalmente no sucede en las presas, salvo en superficies planas como en coronación. En general se produce la formación de fisuras, paralelas a la superficie de exposición, sin depósitos en su interior, ya que no hay neo-formación de productos. El patrón de fisuración está condicionado por la resistencia de las diferentes partes del hormigón, con un resultado prácticamente reticular, sin depósitos en su interior.
 - (m) *Imagen macroscópica*, Presa de Navacerrada helada (Ministerio del Interior en www.X.com, 2020)
 - (n) *Imagen mesoscópica*, Fisuración reticular sin depósitos en su interior (Menéndez, 2010)
 - (o) *Imagen microscópica*, Pasta cementante con fisuración paralela a la superficie de exposición a las bajas temperaturas BSE-EDX (Menéndez, 2010)
- **Corrosión:** La corrosión es un fenómeno expansivo que se produce por formación de óxidos sobre la superficie de las barras de las armaduras. Esta formación de óxidos produce un aumento de volumen con relación a las barras originales lo que hace que se formen fisuras con un desarrollo que sigue la línea de las armaduras, generalmente la cuadrícula del mallazo. También puede producirse la formación de picaduras localizadas en las barras, debido a la acción de los cloruros, esto puede dar lugar a una rotura frágil que produzca la rotura de una barra sin que se hayan observado síntomas previos de corrosión. La incidencia de la corrosión en presas suele ser escasa debido a que se utiliza mayoritariamente hormigón en masa. No obstante, puede producirse corrosión en determinadas partes de la presa, donde se hayan utilizado armaduras superficiales para evitar la fisuración, y también en estructuras auxiliares de hormigón armado. La aparición de óxidos en la superficie está muy influenciada por las condiciones ambientales a las que está expuesto el hormigón (arrastre de agua, agua filtrante, etc.)
 - (p) *Imagen macroscópica*, Tablero con fisuración en forma de cuadrícula, sin manchas de óxidos exudados de la armadura (Menéndez, 2018)
 - (q) *Imagen mesoscópica*, Fisuración que marca la cuadrícula de la armadura en una acera de coronación, no se observa la exudación de óxidos en la superficie (Menéndez, 2018)
 - (r) *Imagen microscópica*, Formación de óxidos en la interfase de una barra de armadura con la pasta cementante, con formación de fisuras; también se observa un poro relleno con óxidos (BSE-EDX) (Menéndez, 1998)



Figura 4.43. Combinación de fenómenos: lixiviación y ataque interno por sulfatos (cortesía de E. Menéndez)

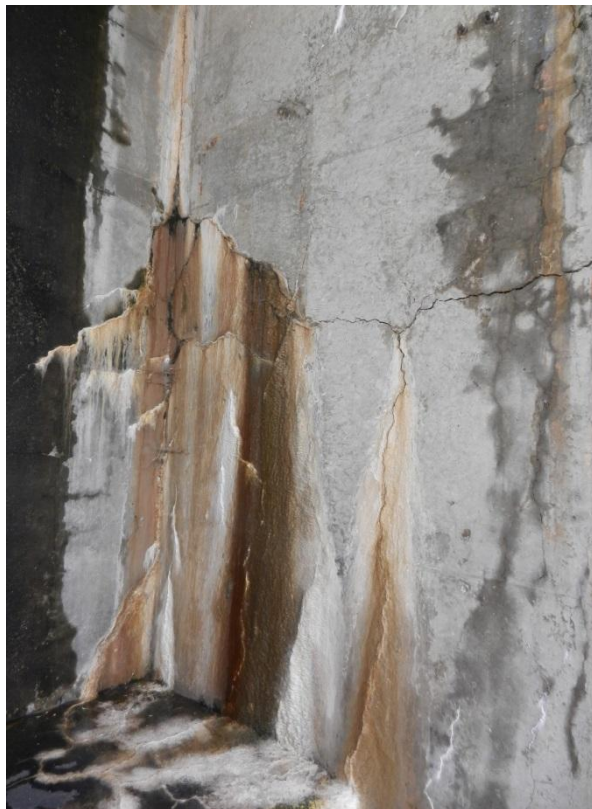


Figura 4.44. Combinación de fenómenos: lixiviación y corrosión (cortesía de E. Menéndez)



Figura 4.45. Lixiviación y reacción álcali-sílice (cortesía de E. Menéndez)

4.3. Sistemas de auscultación para detección

A la hora de detectar posibles comportamientos anómalos en una estructura de hormigón sospechosa de estar afectada por expansión química, será fundamental disponer en la misma

de un sistema de auscultación capaz de poner de manifiesto los efectos que dicha expansión tendría.

Ese sistema de auscultación implementado en la estructura debería complementar y profundizar en las observaciones realizadas mediante las inspecciones visuales descritas en el apartado anterior.

En base a la información que nos pueden proporcionar de cara a detectar una posible expansión química, podemos agrupar los distintos sistemas de auscultación susceptibles de instalarse en la estructura dentro de tres niveles: básico, intermedio y específico (esta última se recoge en el Apartado 7.1, porque está relacionada con el control de la eficacia de las medidas de mitigación).

4.3.1. Instrumentación básica

En primer lugar, sería interesante disponer de un sistema de fácil instalación que proporcione indicios de la existencia de una posible anomalía en la estructura, basada, generalmente, en la evolución de movimientos de puntos seleccionados. Para ello la mejor opción consistiría en un adecuado sistema de **control topográfico** de los desplazamientos que experimenta la estructura:

- a) Movimientos horizontales: mediante colimación angular, bisección, observación geodésica... Estos sistemas de control pondrán de manifiesto una clara tendencia de la estructura a desplazarse en el plano horizontal (ya sea hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, dependiendo de la tipología de presa, así como en dirección tangencial), con movimientos que no se recuperan por completo al igualarse las condiciones estacionales de nivel de embalse y temperatura.

Se recomienda el uso de prismas (Figura 4.46) debido a la rapidez en la toma de lecturas, lo que asegura realizarlas en las mismas condiciones atmosféricas, así como la reducción de errores humanos.



Prisma para monitoreo GPR-112



Estación Total – Leica TM-50

Figura 4.46. Prismas y estación total para control de movimientos horizontales (cortesía de Iberdrola)

➤ *Colimación angular:*

- Elementos que intervienen: pilar de observación + punto de referencia + dianas en coronación de cada bloque (recomendable la utilización de prismas);
- Se miden los ángulos horizontales entre la referencia y cada diana;
- Para simplificar el cálculo, las distancias entre pilar de observación y dianas se pueden considerar fijas, pero en ese caso este método solo proporcionaría los desplazamientos radiales de los puntos controlados. Si se quisiera obtener también los desplazamientos tangenciales no se podría efectuar esa simplificación;
- Más sencillo con planta recta. En planta curva es necesario un pilar de observación por cada alineación, para que las visuales a cada punto sean tangentes al arco que describe la estructura en planta;
- La ubicación de los pilares de observación dependerá de la topografía de la cerrada;
- La simplicidad de este procedimiento permite que pueda ser realizado por un solo topógrafo.

En las Figuras 4.47 y 4.48 se muestra el esquema de este tipo de control topográfico y unos gráficos con resultados en una presa con expansión química.

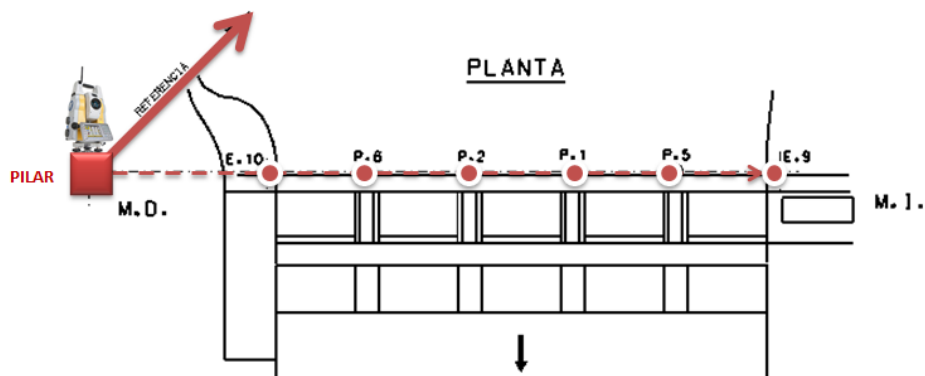


Figura 4.47 Esquema de colimación angular en una presa de planta recta (cortesía de Iberdrola)

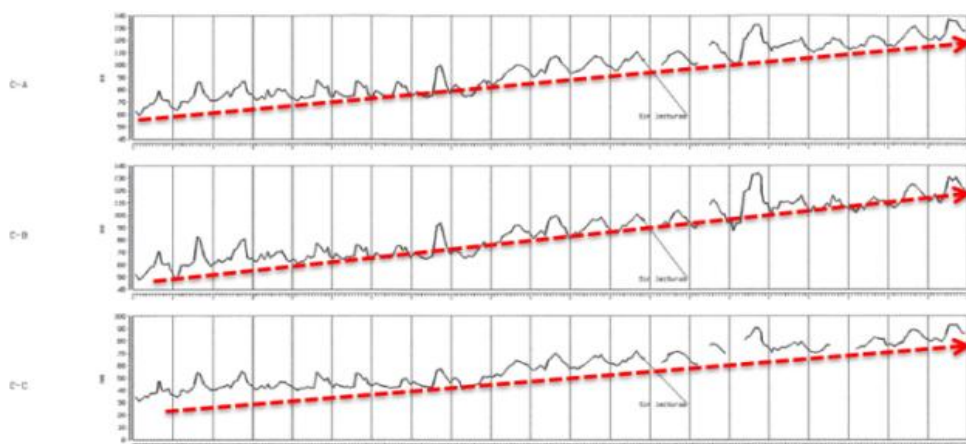


Figura 4.48 Ejemplo de colimación angular de tres bloques de una presa arco con expansión química. Se observa un avance progresivo hacia aguas arriba de aproximadamente 3 mm/año (cortesía de Iberdrola)

➤ *Bisección:*

- Elementos que intervienen: 2 pilares de observación + dianas en coronación de cada bloque (recomendable la utilización de prismas);

- Se miden los ángulos horizontales entre el pilar opuesto y cada diana;
- Las distancias entre pilares de observación se consideran fijas, para lo cual habrá que asegurarse de que esos pilares se sitúen en terreno estable. No obstante, es recomendable realizar un control de posición de pilares periódicamente para comprobar esta hipótesis. Si mediante este control se detectara alguna variación en la posición de los pilares de observación, cabría la hipótesis de un posible movimiento de una o ambas laderas;
- Es más adecuado para planta curva (evita poner un pilar por cada alineación como exigiría una colimación angular);
- La simplicidad de este procedimiento permite que pueda ser realizado por un solo topógrafo, que medirá sucesivamente desde cada uno de los pilares de observación;
- Este método proporciona desplazamientos radiales y tangenciales de cada uno de los puntos controlados.

En la Figura 4.49 se muestra el esquema de este tipo de control topográfico.

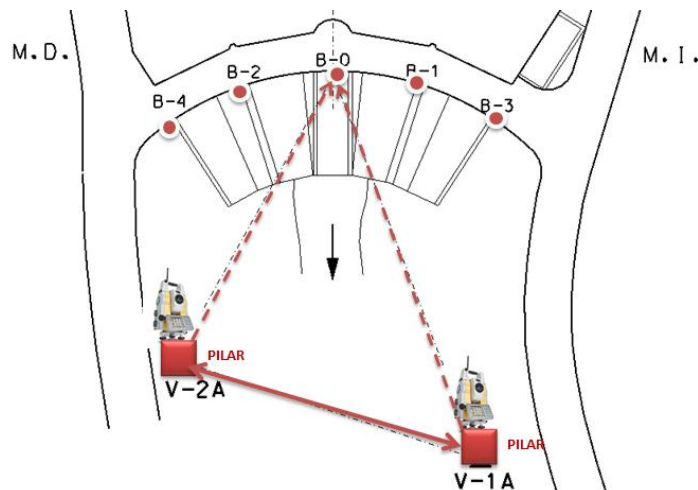


Figura 4.49. Esquema de bisección en una presa de planta curva (cortesía de Iberdrola)

- *Control topográfico mediante bisecciones múltiples:*
 - Mismo procedimiento que la bisección, pero con filas de dianas a distintas cotas;
 - Elementos que intervienen: 3 o más pilares de observación + dianas en cada bloque a distintas cotas;
 - Se agrupan los pilares en parejas, y para cada una de ellas se miden los ángulos horizontales entre el pilar opuesto y cada diana;
 - Las distancias entre pilares de observación se consideran fijas, para lo cual habrá que asegurarse de que esos pilares se sitúen en terreno estable;
 - Controla el paramento completo de aguas abajo (no sólo movimientos en coronación);
 - El cálculo es más complejo, ya que se calculan los desplazamientos tomando pilares 2 a 2 y posteriormente se aplica una media ponderada, asignando un peso diferente a cada pareja de pilares en función de su ángulo visual respecto a las dianas;
 - Recomendable en presas de planta curva o bóvedas, y de grandes dimensiones;
 - Bastaría igualmente con un solo topógrafo para la toma de lecturas;
 - Este método proporciona desplazamientos radiales y tangenciales de cada uno de los puntos controlados.

En la Figura 4.50 se muestra el esquema de este tipo de control topográfico.

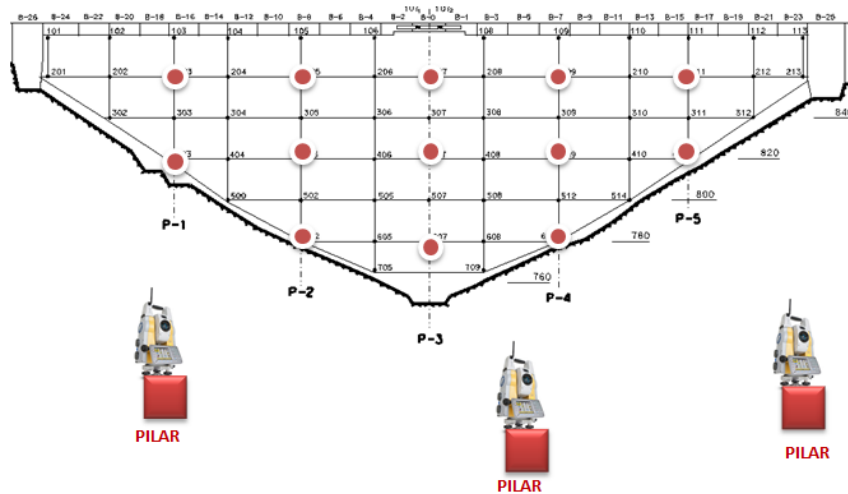


Figura 4.50. Esquema observación geodésica en el alzado de una presa (cortesía de Iberdrola)

- b) Movimientos verticales: una nivelación de precisión permite a posteriori detectar la tendencia irreversible a elevarse de cada uno de los bloques controlados. Al ubicarse las señales de nivelación en la coronación de los bloques, estos movimientos reflejarían el crecimiento en cota de todo el bloque.

En caso de que la presa cuente con galerías interiores, podría ser conveniente disponer un itinerario de nivelación adicional a lo largo de alguna de esas galerías, con el objeto de zonificar el fenómeno de expansión a distintas cotas.

En la Figura 4.51 se muestra un nivel digital para realizar este tipo de mediciones.



Figura 4.51. Nivel digital LEICA (cortesía de Iberdrola)

➤ *Nivelación de precisión:*

- Elementos que intervienen: punto de partida que se considera fijo + clavos de nivelación a lo largo del itinerario + punto de cierre fijo (si es posible);
- Cálculo muy sencillo: se miden las diferencias de cota entre clavos de nivelación sucesivos;
- Distancia máxima recomendada entre clavos: 30 m;

- Necesarios 2 auxiliares de topografía, además del topógrafo;
- Este método proporciona los desplazamientos verticales que experimenta la estructura.

En las Figuras 4.52 a 4.53 y se muestra el esquema de este tipo de control topográfico y unos gráficos con resultados en una presa con expansión química.

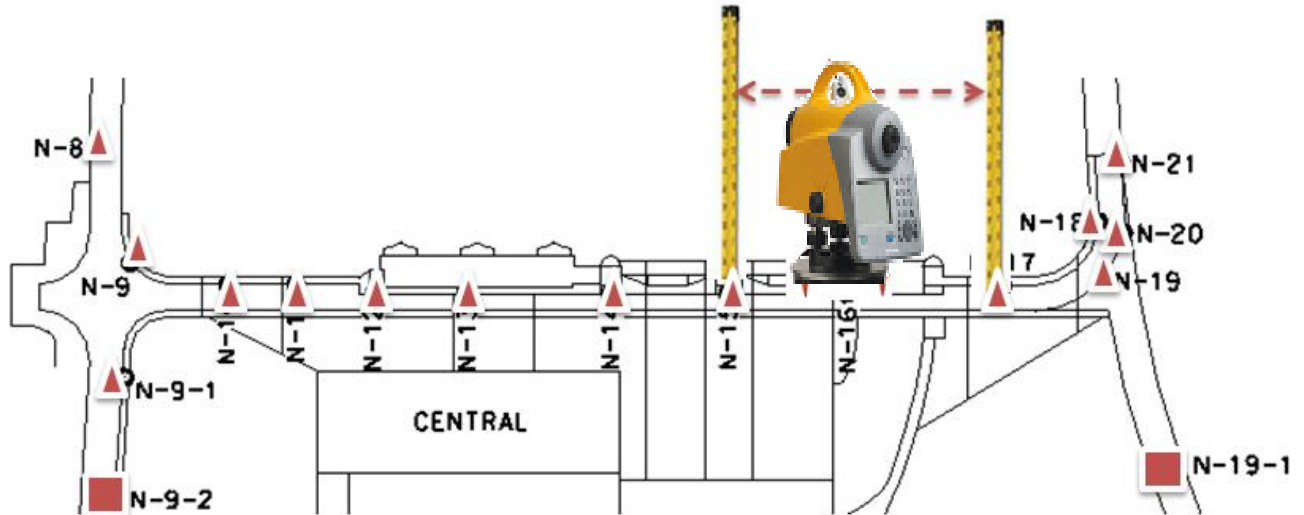


Figura 4.52. Esquema de itinerario de nivelación a lo largo de la coronación de una presa (cortesía de Iberdrola)

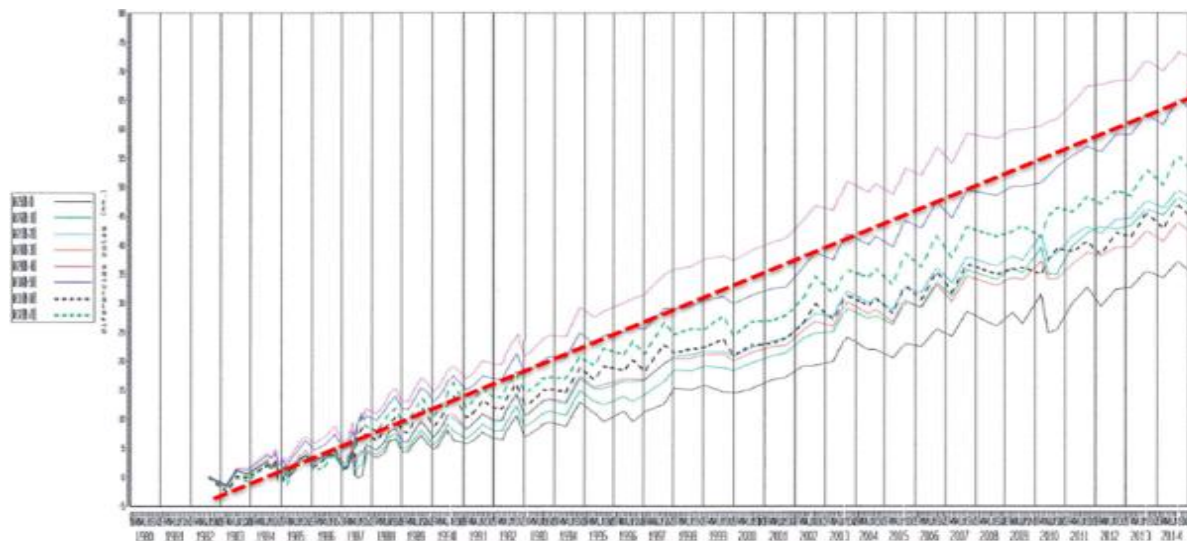


Figura 4.53. Ejemplo de nivelación de coronación en una presa arco. Se observa una elevación progresiva de aproximadamente 2 mm/año en los bloques más afectados por la expansión (cortesía de Iberdrola)

- c) *Medición automática con prismas*: este sistema es alternativo a los controles topográficos convencionales descritos anteriormente. Los principios de cálculo son los mismos pero las mediciones se realizan con un equipo topográfico capaz de realizar automáticamente punterías a prismas haciendo uso de la tecnología ATR (Automatic Target Recognition). En esta tecnología, el sensor ATR emite un haz láser apuntando a un prisma de reflexión convencional que, después de ser reflejado, regresa a un sensor CMOS de alta resolución que alberga el instrumento topográfico. Este sistema es capaz de proporcionar los datos de desplazamiento horizontal y vertical en una misma campaña, si bien estos últimos se obtienen con menor precisión respecto a su determinación por nivelación de precisión.

Con este sistema de medición se obtiene un mayor volumen de datos en menos tiempo debido a que las series en campo se realizan de forma automática, sin necesidad de orientación manual, siendo la estación topográfica la responsable de localizar los puntos de observación.

La exposición a las condiciones ambientales es más corta, lo que se traduce en una menor dispersión en los datos tomados debido a los cambios térmicos, y se elimina del proceso el error debido al factor humano. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se requiere de personal bien formado capaz de manejar con soltura determinados programas informáticos, así como la estación topográfica, cuya configuración de parámetros en el momento de la toma de datos es esencial.



Figura 4.54. Prisma en coronación de presa (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.55. Prisma (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.56. Estación topográfica (cortesía de Iberdrola)

En los últimos años el control topográfico ha evolucionado notablemente, ofreciendo diferentes tecnologías y equipos de medida con mayor precisión y velocidad de lectura.

Con relación a **los sensores geodésicos**, que pueden medir movimientos absolutos o relativos, su precisión puede llegar a ser submilimétrica, penalizando la velocidad de lectura a favor de una mayor precisión. Dentro de estos sensores se engloban las estaciones totales (con o sin

láser escáner), los sistemas GNSS (receptores de señales emitidas por diferentes constelaciones de satélites), los niveles digitales y los sistemas láser escáner.

Por otra parte, los **sensores radar** son capaces de captar movimientos relativos con precisiones menores de 0,1 mm. Dentro de estos tipos de sensores se engloban: InSAR satelital, InSAR aerotransportado y GB-SAR-Radar terrestre (Figuras 4.57. a 4.59).



Figura 4.57 Láser escáner en coronación de presa (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.58 GPS en las inmediaciones de presa (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.59 GPS en coronación de presa (cortesía de Iberdrola)

Es altamente aconsejable que la elección del tipo de sensor y equipo de medida sea realizada por una empresa especializada en auscultación topográfica, y dependerá del elemento a auscultar y sus inmediaciones, de su ubicación, de la existencia de vegetación, y de la precisión deseada. Es necesario que los datos obtenidos sean tratados por un programa informático programado para ello, pues proporcionan una muestra de puntos muy amplia.

4.3.2. Instrumentación intermedia

Los sistemas de auscultación agrupados bajo este epígrafe deben tener por objeto constatar los indicios proporcionados por la instrumentación básica implementada acerca de la existencia de movimientos en la estructura resultantes de un proceso de expansión química.

Algunos de los sistemas más recomendables a instalar son los siguientes:

a) Péndulos:

Los péndulos consisten en una plomada que permite obtener los desplazamientos horizontales (tanto radiales como tangenciales) que experimenta la estructura, intersectando el hilo con bases de lectura a diversas cotas.

En caso de que la presa disponga de este sistema de auscultación, constituye un extraordinario mecanismo de aviso, mostrando avances irreversibles con tasas anuales que suelen ser bastante estables a lo largo del tiempo.

Pueden diferenciarse varios tipos de péndulos:

- Péndulo directo: el hilo del péndulo está anclado en una cota elevada de la estructura, mientras que el contrapeso se encuentra dentro de un depósito inferior, normalmente relleno de aceite o agua, que permite de un modo amortiguado el libre movimiento del hilo siguiendo los desplazamientos de la estructura (Figura 4.60).

Permite obtener los movimientos horizontales relativos de la presa, tanto radiales como tangenciales, ya que el punto de anclaje se encuentra dentro de la propia estructura.

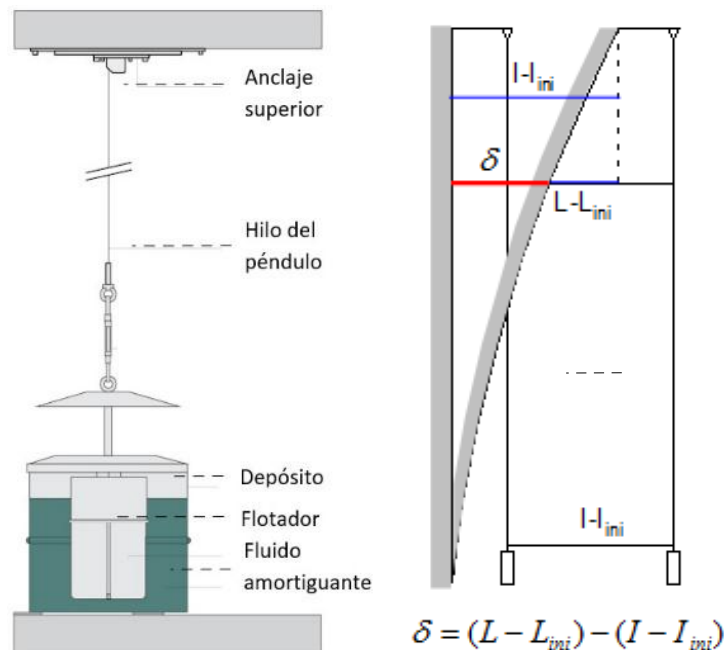


Figura 4.60 Esquema de instalación de un péndulo directo y cálculo del desplazamiento horizontal (cortesía de Iberdrola, basado en catálogo comercial)

- Péndulo invertido: el hilo del péndulo se encuentra anclado a una cota profunda del cimiento, mientras que un flotador (en lugar de contrapeso) se encuentra ubicado dentro de un depósito superior (Figura 4.61).

Permite obtener los movimientos horizontales absolutos de la presa, tanto radiales como tangenciales, ya que el punto de anclaje se encuentra fuera de la propia estructura, considerándose este como fijo.

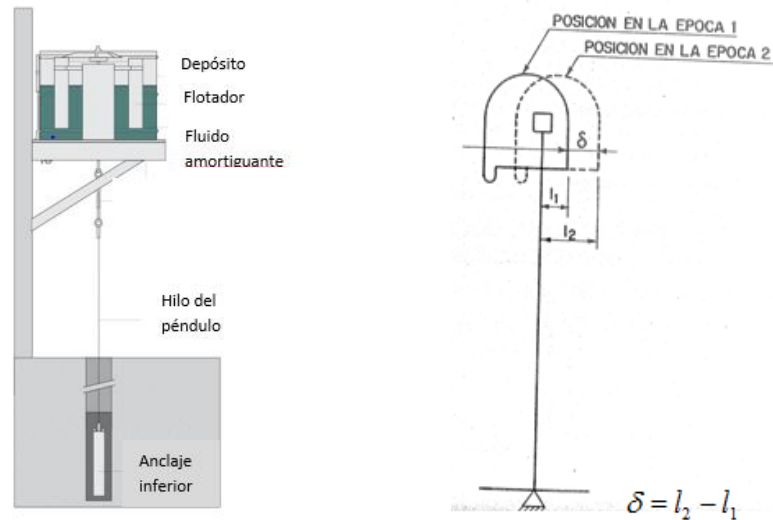


Figura 4.61. Esquema de instalación de un péndulo invertido y cálculo del desplazamiento horizontal (cortesía de Iberdrola, basado en catálogo comercial)

- Péndulo combinado (o mixto): resultante de la combinación de un péndulo directo y uno invertido. Permite transformar los desplazamientos relativos medidos con el péndulo directo en desplazamientos absolutos gracias al punto de anclaje en el cimiento del péndulo invertido (Figuras 4.62 y 4.63).

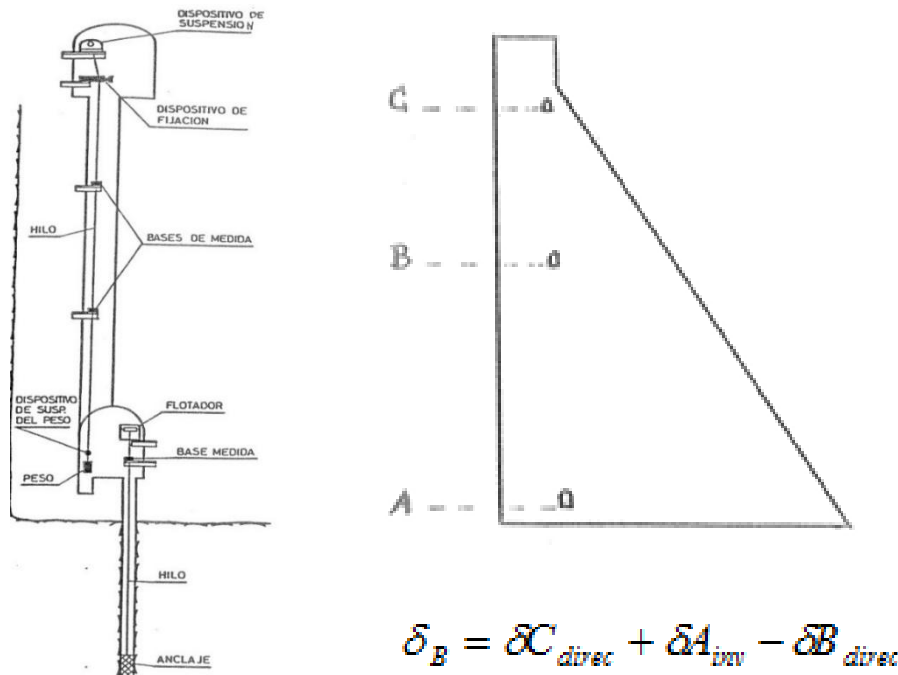


Figura 4.62. y Figura 4.63. Esquema de instalación y cálculo de un péndulo combinado (cortesía de Iberdrola, basado en catálogo comercial)

En los tres tipos de péndulos descritos las lecturas tomadas en las bases ubicadas en diferentes cotas pueden realizarse mediante un coordinómetro (Figura 4.64), siendo el sistema tradicional, o mediante unos sensores ópticos que emiten un haz de luz (péndulo óptico) (Figura 4.65).

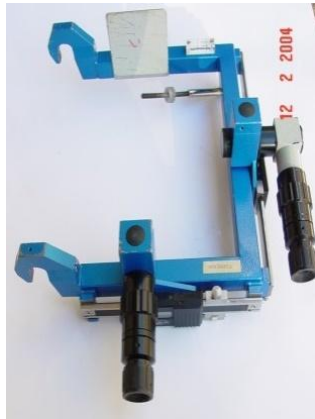


Figura 4.64. Coordinómetro digital Huggemberger (cortesía de Iberdrola)



Figura 4.65. Ejemplo de péndulo óptico combinado: camarín con depósitos (izquierda) y sensores ópticos (derecha), (cortesía de Iberdrola)

b) Ternas de elongámetro:

La instalación de ternas de elongámetro para medir la abertura y deslizamiento de las juntas de la presa, tanto en coronación como en el hastial de diferentes galerías interiores (en caso de que las haya), proporcionará información acerca de los movimientos que experimentan esas juntas. A pesar de que este sistema de instrumentación permite controlar dos dimensiones, su ubicación permitirá aportar información en el plano horizontal (apertura y deslizamiento) si se colocan en coronación o en solera de galería, o en el plano vertical (apertura y elevación) si se colocan en hastiales de galerías.

La existencia de expansión química generalmente genera una abertura remanente entre bloques afectados por expansión del hormigón y en menor medida también un deslizamiento progresivo, aunque también puede darse el caso de observar un cierre paulatino de las juntas de un bloque que está expandiendo. El carácter remanente de estos movimientos será el que proporcione indicios respecto a la posible existencia de expansión química.

En una terna, mediante la lectura con un elongámetro (Figura 4.66) de los tres lados del triángulo inicialmente equilátero que se forma, podrán obtenerse la abertura y deslizamiento de la junta simplemente aplicando una fórmula trigonométrica, tal y como recoge la Figura 4.67.



Figura 4.66. Elongámetro digital (cortesía de Iberdrola)

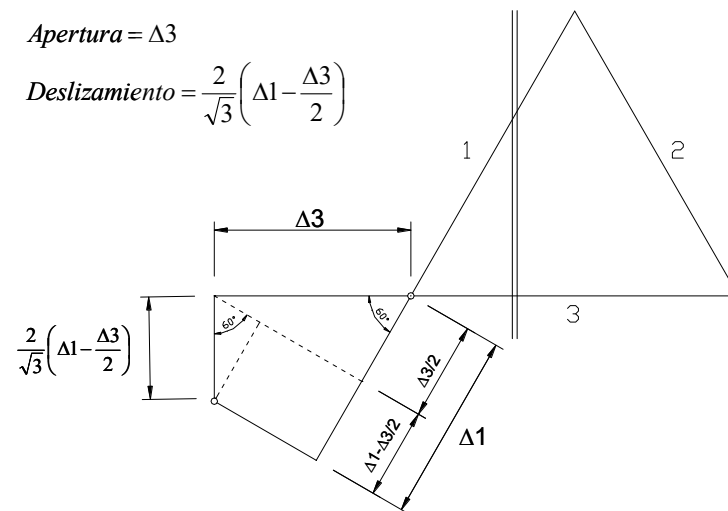


Figura 4.67. Cálculo trigonométrico para obtener la abertura y deslizamiento de una junta a partir de las lecturas obtenidas en una terna de elongámetro (cortesía de Iberdrola, basado en catálogo comercial)

c) Medidores tridireccionales:

Añaden una tercera dimensión a la información que proporciona una terna de elongámetro, permitiendo obtener los desplazamientos de abertura, deslizamiento y elevación (o hundimiento) que tienen lugar en una junta entre bloques de presa, tal y como reflejan las Figuras 4.68 a 4.70.

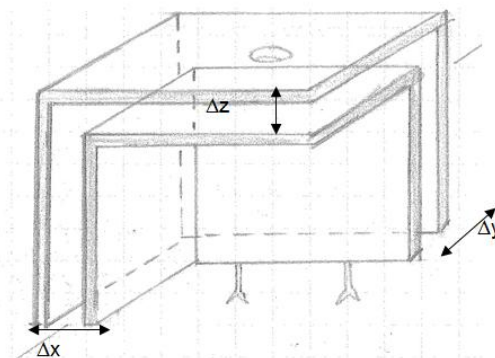


Figura 4.68 Esquema de un medidor tridireccional (cortesía de Iberdrola, basado en catálogo comercial)



Figuras 4.69 y 4.70. Lectura del medidor mediante comparador digital y medidor tridireccional automatizado (cortesía de Iberdrola)

4.3.3. Instrumentación específica

Una vez constatada la existencia de movimientos en la estructura provenientes de, en principio, un proceso de expansión química, pueden instalarse diversos sistemas de auscultación más específicos, que traten de proporcionar una información más detallada de las distintas zonas afectadas y comprobar la eficacia de las medidas de mitigación adoptadas. En el punto 7.1 “Ampliación de la instrumentación” se describen algunos de ellos.

4.3.4. Conclusiones

Como conclusión, cabe mencionar que la expansión del hormigón provocará generalmente (no en todos los casos) avances irreversibles hacia aguas arriba acompañados de una elevación progresiva de los bloques. Estas tendencias generales quedarán reflejadas fundamentalmente en el análisis, mediante las técnicas indicadas en el apartado 6, de la evolución de los movimientos proporcionados por los sistemas de control topográfico instalados en la estructura, así como en los péndulos, ternas o medidores tridireccionales existentes en el exterior y en el interior de algunos de los bloques de presa. Una vez constatada la presencia de esta patología, serán de gran utilidad para la caracterización del fenómeno otros dispositivos que se describen en el apartado 7 “Mitigación”, ya que ayudarán a zonificar y concretar las zonas que se ven más afectadas.

4.4. Bibliografía

- Amberg F., Bremen R., Droz P., Leroy R., Maier J. y Otto B. (2017): “Swelling Dams in Switzerland, Swelling Concrete” in *Dams and Hydraulic Structures*, John Wiley & Sons
- Menéndez, E.; Sanjuán, M.A.; Andrade, C. (1998) “Effects of the reinforcement corrosion induced by chlorides on the interface steel-cement paste in mortars” *2nd International Conference on: The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*. Haifa (Israel)
- Menéndez, E. (2003-2005) *Análisis de la posible incidencia que la presencia de agresivos puede producir en varios tramos de colectores situados entre la fábrica y la depuradora I*. Holmen Paper papelera Peninsular, S.L.
- Menéndez, E. (2008-2010): *Estudio de la expansividad del hormigón en presas, como consecuencia de reacciones químicas expansivas (HOREX)*. Proyecto CDTI nº: IDI: 20070472
- Menéndez, E.; Andrade, C. (2009) “Analysis of deterioration of the concrete of a sewer for industrial waste water with sulphates” *International RILEM TC 211-PAE Final conference on Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Junio de 2009*, Toulouse (Francia)
- Menéndez, E. (2010) *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ISBN: 978-84-89702-24-0 (Autorizado por Esperanza Menéndez, propietaria del @)
- Menéndez, E. (2013a) “Spanish experience with AAR & ISA”. *ICOLD 2013 Congress. Post Tour & Workshop B4- Southeastern US Dams with Alkali-Aggregate Reactions*. Atlanta (USA)
- Menéndez, E. (2013b) “Spanish experience with AAR & ISA”. *ICOLD 2013 Congress. Post Tour & Workshop B4- Southeastern US Dams with Alkali-Aggregate Reactions*. Atlanta (USA)
- Menéndez, E. (2018) “Manifestaciones externas de alteración por procesos físico-químicos en el hormigón por procesos físico-químicos en el hormigón de presas. Causas e identificación” *XI Jornadas Españolas de Presas, 26 al 29 de junio 2018*. León (España) pp 997 – 1006. ISBN 84-89567-23-9
- Ministerio del interior (2020)
<https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FB9Wz7nKIQAA6>

[YO0.jpg&tbnid=s2920aSWR2EnSM&vet=12ahUKEwi-jcmQh6iAAxWzsCcCHX32ALMQMygKegQIARBE..i&imgrefurl=https%3A%2F%2Ftwitter.com%2Finteriorgob%2Fstatus%2F564555168990363648&docid=ztKnBqQ9zNoZM&w=1024&h=759&q=foto%20embalse%20de%20navacerrada%20helado%20filomena&ved=2ahUKEwi-jcmQh6iAAxWzsCcCHX32ALMQMygKegQIARBE](https://www.finterior.gob.es/status/564555168990363648&docid=ztKnBqQ9zNoZM&w=1024&h=759&q=foto%20embalse%20de%20navacerrada%20helado%20filomena&ved=2ahUKEwi-jcmQh6iAAxWzsCcCHX32ALMQMygKegQIARBE)

Pardo, F. (2014): *Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña

Presa de Graus, Tavascan (2020)

[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:PresadeGrausTavascan\(PallarsSobirà\).jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:PresadeGrausTavascan(PallarsSobirà).jpg)

5. Diagnósis

5.1. Información del archivo técnico de la presa

El Archivo Técnico de la presa está compuesto por los documentos que contienen la información sobre la historia de la estructura desde su fase de proyecto, con objeto de que exista una continuidad entre esta y la de construcción, puesta en carga, explotación y posible puesta fuera de servicio. Es obligatorio para el titular de la presa, ya sea público o privado, mantenerlo actualizado para las Grandes Presas y las pequeñas clasificadas como A o B, quedando establecido su contenido en la normativa vigente en materia de seguridad de presas.

El Archivo Técnico de la presa es de gran utilidad para el estudio del fenómeno expansivo, ya que contiene documentos que proporcionan información de gran interés para una correcta caracterización de los materiales empleados en su construcción y para la elaboración, en su caso, de un modelo matemático de la presa capaz de reproducir su comportamiento.

Según la normativa vigente en materia de seguridad de presas, el Archivo Técnico está formado básicamente por los documentos que se citan a continuación, siempre que existan y se tenga constancia de ello:

- Documentos administrativos

- Proyectos de la presa

Son de especial interés los anejos de materiales, geológico-geotécnico, y geometría de la presa del Proyecto de Construcción. En particular, los datos relativos al tipo de cemento, la existencia y dosificación, en su caso, de adiciones, y la tipología y dosificación de los áridos, aportan una valiosa información relacionada con el desarrollo del fenómeno. También es importante disponer de información sobre eventuales cambios en los materiales o en la dosificación de estos.

- Información sobre la construcción

Pueden ser de gran utilidad los informes complementarios de construcción, los resultados de los ensayos y análisis de materiales, los datos geológicos adicionales, las modificaciones del proyecto y los tratamientos de impermeabilización y drenajes del cimientó.

- Clasificación de la presa según el riesgo frente a una potencial rotura y su propuesta

- Normas de explotación, conservación y vigilancia

- Plan de emergencia y documentación relacionada con su implantación

- Programa de Puesta en Carga

- Memoria de puesta en carga y llenado del embalse

- Resultados de las inspecciones periódicas y de auscultación, así como informes periódicos y extraordinarios de comportamiento de la presa y el embalse, equipos y sistemas

Para una correcta calibración del modelo matemático son imprescindibles los resultados de observación y auscultación de la presa, así como su análisis realizado en los Boletines Informativos realizados por el Servicio Técnico de Explotación de la presa. Aquí quedan recogidos los informes sobre el estado del comportamiento de la presa y el embalse.

- Evolución de los niveles de embalse, caudales entrantes y salientes al embalse, y datos meteorológicos
- Registro de datos de la gestión de avenidas
- Informe de puesta en carga
- Datos de gestión de avenidas
- Documentación relativa a trabajos de revisión, conservación y modificaciones realizadas

La realización de algunos tipos de obras puede haber tenido influencia en el desarrollo de la reacción expansiva, por lo que es de interés conocer su alcance para valorar su efectividad en el comportamiento de la presa y su inclusión en el modelo matemático.

- Resultados de las pruebas periódicas de funcionamiento de equipos y de los sistemas eléctricos, hidromecánicos y de comunicaciones
- Informes de los resultados de las revisiones generales y extraordinarias de seguridad

Es altamente recomendable que, una vez confirmada la presencia del fenómeno expansivo en la presa y previo a cualquier estudio de este, se revise el Archivo Técnico de la presa y se extraiga la documentación relativa a:

- Análisis de materiales empleados en su construcción para una correcta planificación de los ensayos de laboratorio, esencial en la caracterización de la patología y dosificación de los componentes;
- Secuencia de hormigonado para la zonificación de la estructura en función del nivel de incidencia de la reacción química;
- Geometría de la presa, geología y geotecnia, y resultados de la inspección, vigilancia y actuaciones de conservación, para la elaboración y calibración de un modelo matemático que reproduzca el desarrollo de la expansión química a futuro;

- Movimientos históricos de la presa e incidentes registrados que aporten información sobre el inicio y la evolución de la reacción química;
- Información sobre las condiciones medioambientales en distintas zonas de la presa, especialmente en lo relativo a temperatura superficial e interior del hormigón, zonas de insolación y viento.

En base al análisis de la información encontrada y a los resultados de los ensayos de laboratorio complementarios, podrá establecerse la conveniencia de una zonificación de la presa en función del desarrollo de la patología, especialmente útil para que los modelos matemáticos puedan reproducir la historia de la estructura y predecir con mayor precisión su futuro comportamiento.

5.2. Selección y toma de muestras

La inspección ocular puede dar indicios sobre la existencia de reacciones expansivas internas en el hormigón, no obstante, es necesario realizar una adecuada selección y toma de muestras para una correcta diagnosis de los problemas detectados.

Las muestras deben ser seleccionadas para que puedan ser consideradas como representativas del hormigón de la estructura. El correcto análisis del hormigón permitirá analizar y valorar el desarrollo de procesos expansivos internos e, incluso, de la simultaneidad de fenómenos expansivos de distintas características, pero cuyo desarrollo está influenciado por similares factores. También este trabajo de selección de muestras está basado en la instrumentación de las presas (ver 5.1 *Información del archivo técnico de la presa*).

Este punto 5.2 está basado en el libro *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo* de Esperanza Menéndez Méndez, que autoriza la cesión del texto, sin ceder el copyright. (Menéndez, 2010a)

Se trata de recopilar todos *los datos disponibles* relativos a la presa y estructuras auxiliares, que puedan ser útiles para hacer una correcta selección de muestras, y establecer el nivel de riesgo de la estructura en función del ambiente al que está sometida.

5.2.1. Recopilación de datos de la estructura

Se realizará un resumen de datos referentes a la estructura, como son (ver 5.1 *Información del archivo técnico de la presa*):

- *Tipo de estructura:* Presa, canal, estación, estructura auxiliar, etc.;
- *Fecha de construcción*
- *Características de la construcción:* Descripción de las fases de ejecución;
- *Características del emplazamiento:* Geología y geomorfología;

- Materiales de construcción: Tipo de cemento, características de los áridos, análisis del agua de amasado, posibles cambios de material efectuados durante la ejecución de la obra y origen de estos;
- Condiciones ambientales durante la construcción y en la vida de la estructura: Humedad, temperatura, pluviometría y temperatura ambiental de la zona, posibles ciclos de humedad-secado del hormigón, cualquier otra información ambiental que se considere relevante;
- Estado actual de la estructura: Si se realiza algún tipo de control sobre la misma, posibles datos de auscultación, informes de inspección describiendo la presencia y extensión de fisuras u otros síntomas de alteración por procesos expansivos internos y;
- Actuaciones realizadas en la estructura: Reparaciones, sustituciones parciales de algún elemento, informes previos sobre la degradación existente en la estructura, etc.

5.2.2. Nivel de riesgo de la estructura

El riesgo combina la probabilidad de que ocurra un suceso peligroso con la severidad de los daños ocasionados. Cuando se relaja el concepto y no se determina la probabilidad de ocurrencia, entonces el riesgo o daño es potencial. En el contexto de esta monografía, la peligrosidad se refiere a la capacidad de expansión del hormigón de la presa, que de manera efectiva está condicionada por el tipo de exposición ambiental. La vulnerabilidad corresponde con el grado de susceptibilidad o gravedad de los efectos desencadenados, que depende de las prestaciones e importancia de la estructura. Este apartado combina la exposición y la vulnerabilidad para determinar el nivel de riesgo (o daño) potencial.

Clasificación de los tipos de exposición ambiental:

Se establecen cuatro clases ambientales, siendo la más agresiva la Clase 4 y la menos la Clase 1. Las clases de exposición son comunes para todos los procesos de deterioro cuyo vehículo de deterioro sea el agua (Menéndez, 2010a).

Clase 1: Ambiente seco o poco húmedo (H.R. < 80%).

- Habitaciones en el interior de edificios.
- Obras protegidas contra el aporte de agua, la intemperie y las condensaciones con un mantenimiento regular de la estanqueidad.
- Enlosados de terrenos secos.
- Piezas de espesor inferior a 50 cm.

Clase 2: Ambiente con humedad > 80% o contacto ocasional con agua.

- Interior de obras con humedad elevada (cámaras de carga, cuenco amortiguador, depósitos, etc.).
- Partes exteriores no expuestas.
- Partes sin contacto con agua o en contacto con terrenos no agresivos.

Clase 3: Ambiente con humedad > 80% y contacto habitual o permanente con agua

- Partes interiores o exteriores expuestas en contacto habitual con agua o con suelos agresivos y/o aguas agresivas.

Clase 4: Ambiente con agua y condiciones ambientales agresivas (iones agresivos y/o ciclos de temperatura)

- Elementos en contacto habitual o permanente con agua y/o con iones agresivos, completa o parcialmente inmersos, incluidas zonas de salpicaduras.
- Elementos en contacto con agua y expuestos a condiciones ambientales agresivas (ciclos humedad-secado, ciclos temperatura, ciclos de hielo-deshielo, etc.).

Categoría de la estructura en cuanto al riesgo:

Este concepto está especialmente relacionado con las consecuencias que pueda tener un fallo de seguridad en la estructura.

Se diferencian tres categorías, asociadas al riesgo de daño:

Categoría I:

- Elementos no portantes situados en el interior de edificios;
- Elementos fácilmente reemplazables;
- Obras provisionales;
- Productos prefabricados de hormigón no expuestos.

Categoría II

- La mayor parte de las edificaciones y de las obras de ingeniería civil.

Categoría III: Obras de ingeniería civil para las que el riesgo de aparición de reacciones expansivas es altamente peligroso:

- Edificios de reactores de centrales nucleares y refrigeradores;
- Presas;
- Túneles;
- Puentes y viaductos de especial relevancia donde no se puede admitir fisuración;
- Monumentos u obras con alto valor patrimonial.

Matriz de daño:

Esta matriz relaciona la categoría de la estructura, en cuanto a las consecuencias del fallo, con relación a la clase de exposición ambiental de la misma. En la Tabla 5.1 se recoge esta matriz de daño.

Tabla 5.1. Matriz de daño.

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Categoría I	A	A	A	A
Categoría II	A	B	B	C
Categoría III	A	B	C	C

Los niveles de riesgo se clasifican en tres grupos: A, B y C.

- **Nivel A:** Pocas probabilidades de producirse alteraciones por procesos expansivos internos en el hormigón. En caso de producirse daño sería poco significativo. Puede ser suficiente un control rutinario de la estructura.
- **Nivel B:** Probabilidad media de producirse alteraciones por procesos expansivos internos en el hormigón. En caso de producirse daño sería significativo. Sería necesaria una diagnosis del origen del daño.
- **Nivel C:** Probabilidad alta de producirse alteraciones por procesos expansivos internos en el hormigón, que pueden producir daños muy importantes y efectos peligrosos. Sería necesaria una diagnosis del origen del daño y una evaluación estructural.

A continuación, se describen los trabajos básicos para la selección y toma de muestras, que permitan diagnosticar el origen del daño.

5.2.3. Trabajos *in situ*

Una de las partes más importantes para la correcta diagnosis es la inspección in-situ para definir el alcance de los trabajos a realizar y fijar las distintas zonas de toma de muestras.

En el trabajo sobre el proyecto PREXES (Menéndez, 2017) se recoge una metodología avanzada para definir una zonificación de tipos de hormigón en una presa, en base a la información de archivo de la presa.











Zonificación del daño. Tipo y extensión

Las presas son estructuras muy grandes, netamente tridimensionales, que están sometidas a distintas condiciones en diferentes áreas, por ello es conveniente disponer de planos donde se puedan representar las zonas con distintos síntomas de alteración. Si no fuese posible se realizaría un esquema más o menos simplificado en función de las anomalías detectadas.

Codificación del tipo de daño

En función de los síntomas relacionados con las patologías analizadas, la zonificación de la estructura se puede realizar según la presencia de uno o varios de los síntomas que se recogen en la Tabla 5.2 (basada en IECA 2010 y modificada por Menéndez, 2020).

Tabla 5.2. Codificación del tipo de daño

Tipo de daño		Símbolo
Fisuración ramificada sin depósitos		
Fisuración ramificada con diferente coloración en el contorno		
Fisuración reticular		
Desprendimiento superficial de material	Masivo	
	Moderado	
	Leve	
Presencia de depósitos en la superficie		
Pérdida de material en esquinas o áreas expuestas		
Desalineación y/o separación entre elementos contiguos		
Fisuración direccional		

En cada caso se marcará, en el área correspondiente, el tipo de alteración observada o bien la presencia de varias alteraciones combinadas. Por su parte, la toma de muestras y extracción de testigos en la estructura estará definida por las distintas áreas identificadas y tendrá que representar adecuadamente las condiciones de todas ellas (Menéndez, 2010a).

Análisis de fisuras y descamaciones

Las observaciones que se deben anotar durante la inspección *in situ* se recogen en las Tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3. Características de las fisuras
Características de las fisuras en el hormigón

Característica		SÍ	NO	Observaciones
• Linealidad				
• Ramificación				
• Paralelismo				
• Formación de retículas				
• Formación de mapeados				
• Trazado en el hormigón	○ Intergranulares			
	○ Intragranulares			
• Profundidad	○ Superficial			
	○ Indefinida			
• Presencia de depósitos	○ Alrededor de la fisura			
	○ En la fisura			
• Coloración de los depósitos				
• Aspecto de los depósitos	○ Tipo gel			
	○ Tipo microcristalino			

Tabla 5.4. Características de las descamaciones y pérdidas de material.
Características de las descamaciones y pérdidas de material en el hormigón

		SÍ	NO	Observaciones
Pérdidas de material	Aislada			
	En áreas			
	Masivas			
Espesor	Superficial (< 1 cm)			
	Media (1 – 3 cm)			
	Profunda (> 3 cm)			
Presencia de depósitos	En torno a áridos			
	Sobre la pasta			
Aspecto de los depósitos	Tipo gel			
	Tipo microcristalino			
Rotura del material	Intergranular			
	Intragranular			
Pérdidas localizadas de material				

Hay que tener en cuenta que pueden aparecer patrones macroscópicos de fisuración similares para diferentes tipos de patologías, asociadas o no con procesos expansivos de origen interno

en el hormigón. Por ello, es necesario realizar un examen detallado en un laboratorio con experiencia contrastada.

Datos complementarios de la estructura

Algunos datos relevantes a tener en cuenta en el análisis de la estructura son los siguientes:

- Fecha de aparición de la patología;
- Grado de desarrollo de la patología en distintas zonas;
- Cambios de uso;
- Obras y modificaciones en la estructura y relación con la evolución de la patología;
- Mantenimiento realizado;
- Limpieza y reparaciones;
- Productos utilizados;
- Etc.

Esta información puede ser útil para realizar la valoración de posibles cambios y evolución de la patología en la estructura. No obstante, tendrá un carácter orientativo y deberá ser utilizada con una cierta cautela, si no está adecuadamente documentada.

5.2.4. Extracción de testigos

La extracción de testigos es una de las partes fundamentales para la correcta diagnosis del daño existente en una estructura. De su representatividad respecto del conjunto dependerá la diagnosis apropiada del hormigón de las presas (Menéndez, 2010a).

Representatividad de las muestras a extraer

Para garantizar la representatividad de las muestras para su ensayo en laboratorio es fundamental los trabajos previos de análisis de la documentación de la presa y la inspección *in situ*. En el caso de las presas puede ser necesaria una segunda campaña de extracción de testigos tras los primeros ensayos de laboratorio.

Para garantizar la representatividad se pueden aplicar dos criterios generales, en función del tipo de estructura y del tipo de daño que se pretende analizar:

- **Muestras de gran tamaño:** Este sistema se utilizará para estructuras de grandes dimensiones en las que puedan seleccionarse claramente las áreas de interés y en las que no existan problemas para la extracción de muestras de gran tamaño. Un ejemplo es la

extracción de bloques de 1 m³ para aumentar la representatividad de la resistencia a compresión (Gil, 2011).

- **Testigos en distintas zonas:** Se extraen testigos en distintas zonas singulares que presenten distintos tipos de patologías como fisuración, depósitos, etc. y de zonas de referencia aparentemente no alteradas. Se pueden tomar testigos de varios metros de profundidad en las áreas definidas.

Las condiciones que hay que tener en cuenta a la hora de la toma de muestras y la aplicación de un criterio de selección son las siguientes:

- **Factores que influyen sobre el desarrollo de las posibles patologías:** Temperatura, humedad, estado tensional, ciclos de humedad-secado, oscilación del nivel del embalse, viento, insolación, etc.
- **Tamaño de los componentes del material:** Especialmente, el tamaño máximo de los áridos del hormigón respecto a las dimensiones de la muestra.
- **Ensayos por realizar:** Es necesario prever los ensayos que se van a efectuar para la diagnosis con el fin de disponer de suficiente cantidad de muestras.
- **Cantidad mínima de ensayos con suficiente representatividad:** Hay que establecer la cantidad mínima de ensayos a realizar para obtener la información necesaria para una correcta diagnosis de la patología existente.

Selección de las zonas de extracción de testigos

La selección de las zonas para la extracción de testigos se realizará en función de las observaciones realizadas en los trabajos *in situ*. Hay que definir las diferentes áreas sensibles de la estructura, donde pueden localizarse síntomas específicos del desarrollo de procesos expansivos, como son los especificados en el Capítulo 4 y en el Apartado 5.2.3:

- Presencia de fisuras;
- Presencia de depósitos en la superficie;
- Pérdidas de material;
- Decoloración en torno a fisuras ramificadas;
- Depósitos en zonas fisuradas;
- Desalineación de juntas entre elementos contiguos;
- Presencia de filtraciones;
- Etc.

Selección de testigos

Una vez definidas las áreas de interés de la estructura, en función de las patologías observadas, se seleccionarán los testigos a extraer, teniendo en cuenta su representatividad. El número de testigos será función de las áreas a estudiar detectadas en la estructura.

Adicionalmente se tomarán testigos de zonas no afectadas por ninguna patología; estos testigos serán considerados como referencia del hormigón original, sin alterar.

Identificación y acondicionamiento de los testigos para su traslado al laboratorio

Un esquema de datos a recopilar en la extracción de los testigos se recoge en la Tabla 5.5. (Menéndez, 2010a, basada en BCA, 1992):

Tabla 5.5. Esquema de ficha de recogida de datos de los testigos extraídos de la estructura.

MUESTRA:				
Tipo de estructura		Localización	Trabajo	Referencia
Fecha		Tipo de broca	Operador	
Localización y profundidad del testigo en la estructura (incluyendo medidas de referencia)			Fotografía (Marcar) Testigo <input type="checkbox"/> Agujero <input type="checkbox"/>	
Dirección de extracción			Método de refrigerante	Diámetro de la broca
Vertical hacia arriba	<input type="checkbox"/>		Agua	<input type="checkbox"/>
Vertical hacia abajo	<input type="checkbox"/>		Aire	<input type="checkbox"/>
Horizontal	<input type="checkbox"/>		Seco	<input type="checkbox"/>
Inclinado	<input type="checkbox"/>		Anticongelante	<input type="checkbox"/>
Ángulo aproximado	+ α <input type="checkbox"/>			
	- α <input type="checkbox"/>			
Profundidad carbonatación		Número de fragmentos		Tamaño de las armaduras:
Max.	Min.			Distancia entre armaduras:
		Longitud		Condición:
		Máx.	Mín.	Vertical u horizontal:
Comentarios del operario sobre los testigos (condiciones de las armaduras, fisuras, delaminaciones del hormigón, etc.)				
Comentarios del operario sobre el agujero del testigo (fisuras, huecos, mala compactación, armaduras, pérdida de agua durante la extracción, etc.)				
Esquema del agujero del testigo (si es necesario)				
Observaciones:				
1. Número de referencia de todos los testigos				
2. Fotografía o esquema de todos los trozos de testigos				
3. Denominación de todos los trozos de testigos				
4. Si se ha destruido parte del hormigón de la superficie durante la extracción, marcar el testigo con la profundidad aproximada desde la nueva superficie				

Los testigos de hormigón una vez extraídos de la estructura deberán ser enviados inmediatamente al laboratorio para ser ensayados lo antes posible, con el fin de evitar su alteración y obtener los resultados más aproximados a la situación de esta. Las muestras se deben proteger de la carbonatación y de la humedad ambiental, para ello deben ser identificadas y protegidas con plástico inmediatamente después de extraerlas de la estructura y hasta su recepción en el laboratorio.

Análisis del hormigón en el laboratorio

Una vez extraídos los testigos de hormigón y trasladados al laboratorio es necesario la catalogación e identificación de estos, para su identificación mediante los pertinentes ensayos de laboratorio.

Se enumeran a continuación los principales pasos para la correcta selección de muestras y la diagnosis de fenómenos expansivos en presas.

- **PASO 1:** Inspección visual de la estructura;
- **PASO 2:** Selección de áreas de hormigón de la estructura para su análisis;
- **PASO 3:** Extracción y catalogación de testigos de hormigón;
- **PASO 4:** Inspección de testigos en el laboratorio;
- **PASO 5:** Análisis estereomicroscopio;
- **PASO 6:** Selección de muestras para su análisis por técnicas microscópicas;
- **PASO 7:** Análisis microestructural por técnicas microscópicas;
- **PASO 8:** Análisis de información complementaria;
- **PASO 9:** Integración de la información obtenida.

Los ensayos indicados a partir del paso 5 se describen en los siguientes apartados de este capítulo (5.3 a 5.6).

5.3. Análisis macroscópico de las presas para la selección de muestras para su ensayo en laboratorios

El análisis visual de la estructura permite localizar la forma y extensión del deterioro y observar la localización de estos con relación a las acciones a las que el hormigón está sometido. Algunas de estas acciones son las ambientales, como: humedad, temperatura, ciclos estacionales, presencia de agua, presencia de agresivos, etc.; además de las tensiones en las distintas zonas de la estructura.

Una vez realizada la inspección visual y la valoración de las observaciones realizadas, es posible seleccionar las zonas de interés para la extracción de testigos. Hay que tener en cuenta que el hormigón extraído en estos testigos debe ser representativo de los fenómenos observados, pero también de la estructura y de las diferentes zonas de esta sometidas a las diversas acciones (Menéndez, 2010a).

5.3.1. Catalogación y análisis macroscópico de los testigos para su ensayo en el laboratorio

La extracción de los testigos de hormigón seleccionados ha de tener en cuenta las peculiaridades de las zonas de estudio y será realizada de forma que la información obtenida pueda ser representativa de la estructura. Además, se debe garantizar que la interacción con el material, durante y después de la extracción, no produzca alteraciones que desvirtúen los resultados o puedan incidir negativamente en la diagnosis y valoración del origen de la degradación del hormigón. Como se ha indicado en el Apartados 5.2.3 y 5.2.4 se debe realizar

una catalogación de los testigos extraídos anotando en esta las características relativas a los mismos, así como las observaciones que se consideren relevantes para el estudio.

Una vez recibidos en el laboratorio los testigos extraídos es necesario inspeccionarlos, de acuerdo con los criterios indicados en el Apartado 5.2.4. Esta inspección debe proporcionar datos generales sobre el tipo de daño y las zonas de interés para la correcta diagnosis de los fenómenos de alteración del material. Los resultados de esta inspección se recogerán y catalogarán de forma que sean una herramienta para la trazabilidad de las muestras ensayadas, tanto en la estructura de hormigón, como con relación a los resultados de análisis microestructural del hormigón. Así mismo, esta información será útil para la integración de la información y valorar las consecuencias de un determinado fenómeno expansivo de origen interno con relación al deterioro observado la estructura (Menéndez, 2010a).

5.3.2. Técnicas de distribución de daño analizadas *in situ*. Índices de fisuración macroscópicos

- **Método francés:** Este método permite caracterizar de forma convencional el estado de daño a tiempo dado de las estructuras de hormigón. Permite estudiar la evolución de esa estructura con el tiempo, cuando se comparan los índices con el tiempo.

Se dibujan cuatro ejes, trazados en una zona de un metro cuadrado, según el esquema de la Figura 5.1. Se determina, con la ayuda de un fisurómetro, el espesor de todas las fisuras que interceptan los ejes (Figura 5.2).

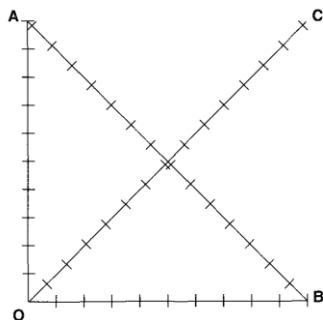


Figura 5.1. Esquema de los ejes trazados.

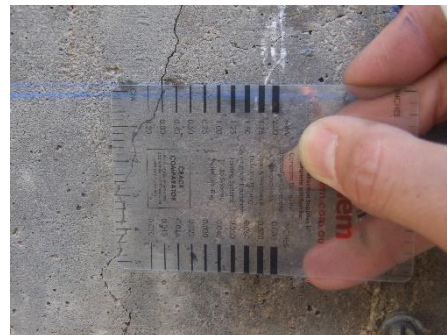


Figura 5.2. Fisurómetro (cortesía del IETcc)

El índice de fisuras se determina mediante el cálculo de la media aritmética del sumatorio del ancho de fisura (en mm) que intercepta en cada uno de los ejes trazados, ajustado a un metro lineal y se expresa como, mm/m. El índice de fisura se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IF = \frac{\frac{\sum e_i}{n}}{4}$$

Donde,

- e_i , es el espesor de cada fisura que intercepta en el eje
- n , es el número total de fisuras que interceptan en el eje
- L , es la longitud del eje trazado

En la Tabla 5.6 se recoge la clasificación del daño en el hormigón, según el valor de índice de fisuras obtenido, de acuerdo con el método seguido: Méthode d'essai n° 47 del LPC “Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton”.

Tabla 5.6. Clasificación del daño según valor del índice de fisuras.

Valor IF	Clasificación de fisuración
0 – 0,5	Despreciable
0,5 – 1	Bajo
1 – 2	Moderado
2 – 5	Fuerte
5 – 10	Muy Fuerte
>10	Considerable (cuantiosa)

- **Método combinado:** El método consiste en medir, con la ayuda de un fisurómetro, el total de fisuras que interceptan a los cuatro lados de un cuadrado 50 cm de longitud (Figura 5.3).

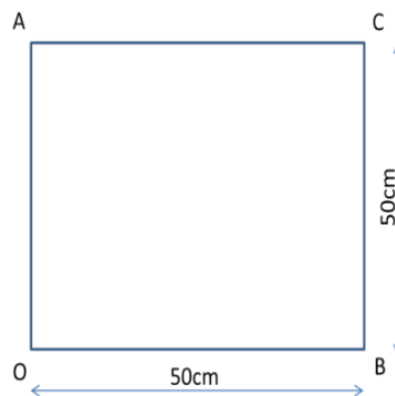


Figura 5.3. Esquema de medida para cuantificación de fisuras por el método combinado.

El índice de fisuras combinado se calcula realizando la media del sumatorio de los anchos de las fisuras (en mm) que interceptan en cada uno de los lados del cuadrado, ajustado a un metro lineal. Igual que en el índice de fisuración determinado por el método francés, se puede analizar la evolución de la fisuración comparando en el tiempo los valores obtenidos.

En la Tabla 5.7 se recogen los criterios de clasificación del daño en el hormigón que se recogen en el documento “Seabrook Station: Impact of Alkali-Silica Reaction on concrete Structures and Attachments” (NextEra Energy Seabrook, LLC):

Tabla 5.7. Criterio de clasificación.

Valor CCI (índice de fisuración combinado)	Ancho de fisura individual	Recomendación para el componente de hormigón individual
Cualquier zona con indicios de patrón de fisuración o aportación de agua		Monitorización
$\geq 0,6$ mm/m	$\geq 0,2$ mm/m	Monitorización y estimación de la tendencia
$\geq 1,0$ mm/m	$\geq 1,0$ mm/m	Evaluación estructural

1. **Determinación de la longitud de las fisuras mediante tratamiento de imagen:** Este método permite cuantificar la longitud de las fisuras comprendidas en una superficie de aproximadamente de $0,25 \text{ m}^2$, dicha cuantificación se realiza mediante tratamiento de imagen con el programa ImaJ (Menéndez y Aldea, 2017).

En la Figura 5.4 (a, b y c) se puede observar las mediciones de la imagen obtenida en la estructura (a), la imagen digitalizada (b) y la medición de las fisuras mediante tratamiento de imagen (c).

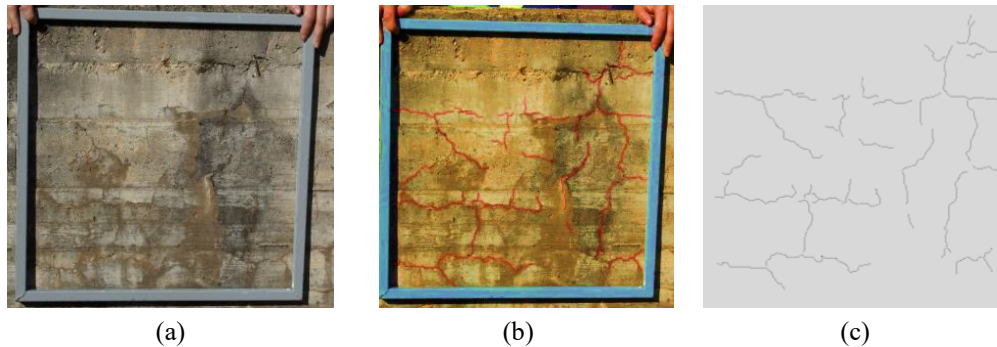


Figura 5.4. Ejemplo de ensayo de fisuración total analizado por tratamiento de imagen.

La ventaja fundamental de estas técnicas es que sirven para ver la evolución de la fisuración mediante técnicas no destructivas. Y la desventaja es que solo se puede analizar la superficie exterior. Esto puede implicar no valorar adecuadamente la degradación en el interior del hormigón, lo que es especialmente problemático en presas debido al gran volumen de hormigón y las distintas condiciones del hormigón en diferentes áreas de la presa.

5.4. Análisis meso y microscópico de la presencia de reacciones expansivas en laboratorio

Hay diversas técnicas de análisis de materiales que se aplican para obtener información directa o indirecta que permitan el diagnóstico de la presencia de reacciones expansivas en el hormigón e incluso determinar el grado de evolución de la reacción, hasta el momento de la inspección (Sauma, 2018).

5.4.1. Caracterización estereomicroscopía y por microscopía óptica

- ***Análisis mediante estereomicroscopía:*** El análisis del hormigón de los testigos mediante esta técnica permite la selección de las áreas o zonas de interés para la detección y diagnosis de los fenómenos expansivos de origen interno. Este análisis constituye la primera fase de la diagnosis y permite valorar la incidencia y extensión de un determinado fenómeno de deterioro del hormigón, a nivel microestructural (ver Capítulo 2). Un

ejemplo del aspecto de productos de reacción por estereomicroscopía se recogen en las Figuras 5.5 y 5.6.



Figura 5.5. Áridos reaccionados con formación de anillo de reacción.



Figura 5.6. Áridos reaccionados.

- ***Análisis mediante microscopía óptica con lámina delgada:*** Esta técnica permite analizar la tipología de los áridos y ver la morfología (Tabla 2.1) y la cantidad del material reactivo. Así mismo, se pueden identificar distintos tipos de productos asociados con productos expansivos.

5.4.2. Caracterización por microscopía electrónica

- ***Selección de muestras para su análisis por técnicas microscópicas:*** Utilizando la información obtenida, después del análisis visual de los testigos y del análisis mediante estereomicroscopía es posible realizar una adecuada selección de las muestras a ser analizadas mediante técnicas microscópicas, permitiendo, además, mantener una adecuada trazabilidad y representatividad de estas frente al fenómeno de degradación que pueda estar afectando a la estructura de hormigón.
- ***Análisis microestructural por técnicas de microscopía electrónica:*** La correcta utilización de las técnicas de microscopía electrónica y la interpretación de los resultados obtenidos, permitirá una adecuada diagnosis de los fenómenos expansivos de origen interno que hayan podido producirse en el hormigón. Este análisis requiere una especialización adecuada, que permita la identificación correcta de los productos o síntomas de alteración, así como la valoración de estos con relación a la alteración que muestre la estructura.
 - **Análisis microestructural, mediante microscopía electrónica de barrido combinada con energías dispersivas de rayos X (SEM-EDX):** Se analizan por microscopía electrónica muestras, en superficie de fractura, con los productos de reacción observados en el análisis por estereomicroscopía, con el fin de verificar que se tratan de productos de reacción árido-álcali y cristalizaciones de etringita. Un ejemplo del aspecto de productos de reacción por microscopía electrónica de barrido combinada

y microanálisis por energías dispersivas de rayos X se pueden ver en las Figuras 5.7 y 5.8.

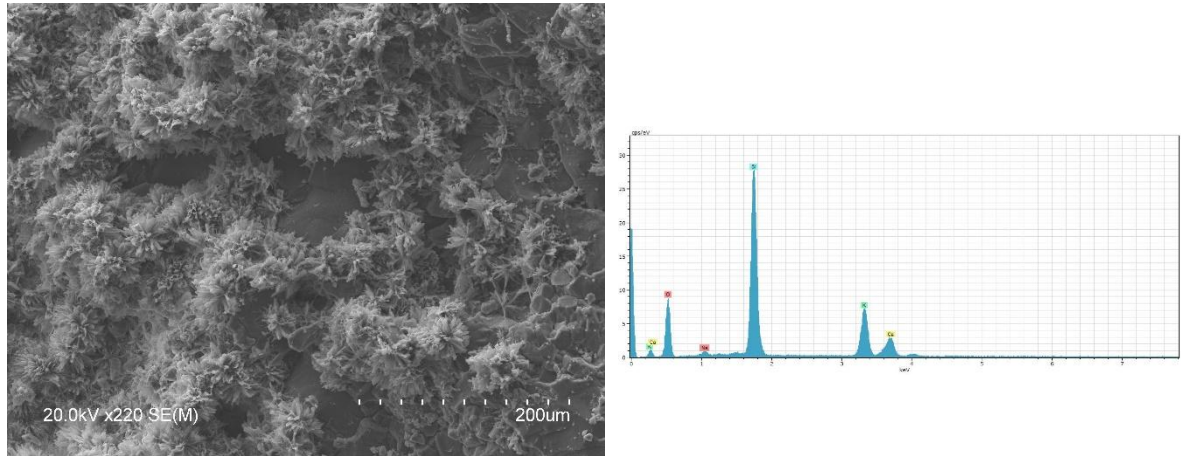


Figura 5.7. Producto de reacción árido-álcali en superficie de fractura y análisis asociado.

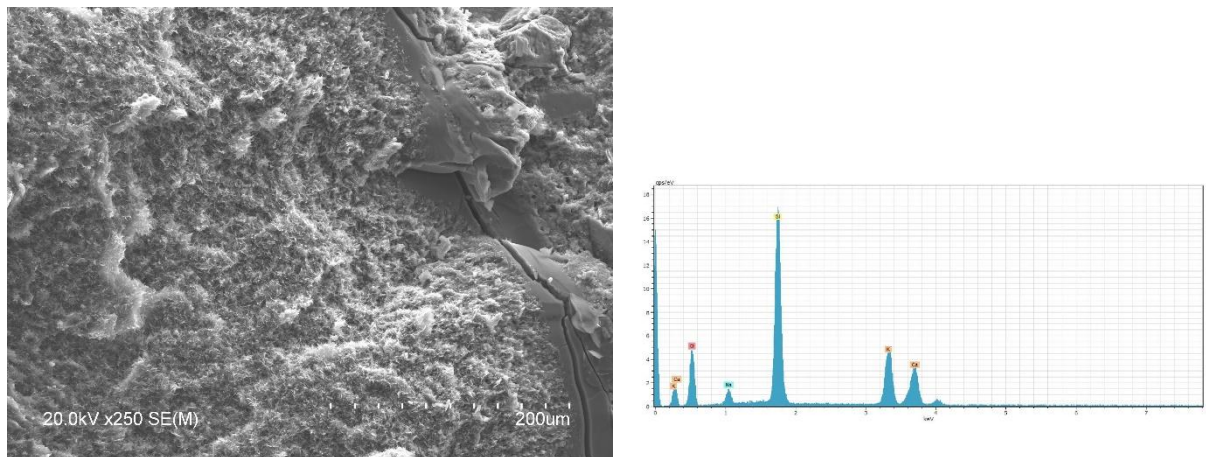


Figura 5. 8. Productos de reacción árido-álcali en poro y análisis asociado.

- Análisis microestructural, mediante microscopía electrónica de electrones retrodispersados combinada con energías dispersivas de rayos X (BSE-EDX): Mediante la utilización de esta técnica, se analizan muestras pulidas de hormigón observándose el aspecto de la pasta cementante, de los áridos y de las interfases de estos con la pasta. Se obtiene un análisis microestructural del hormigón, además de la composición elemental asociada con los compuestos presentes, identificadas a través de las diferentes microestructuras. En la Figura 5.9 pueden verse geles de reacción árido-álcali entre áridos reactivos.

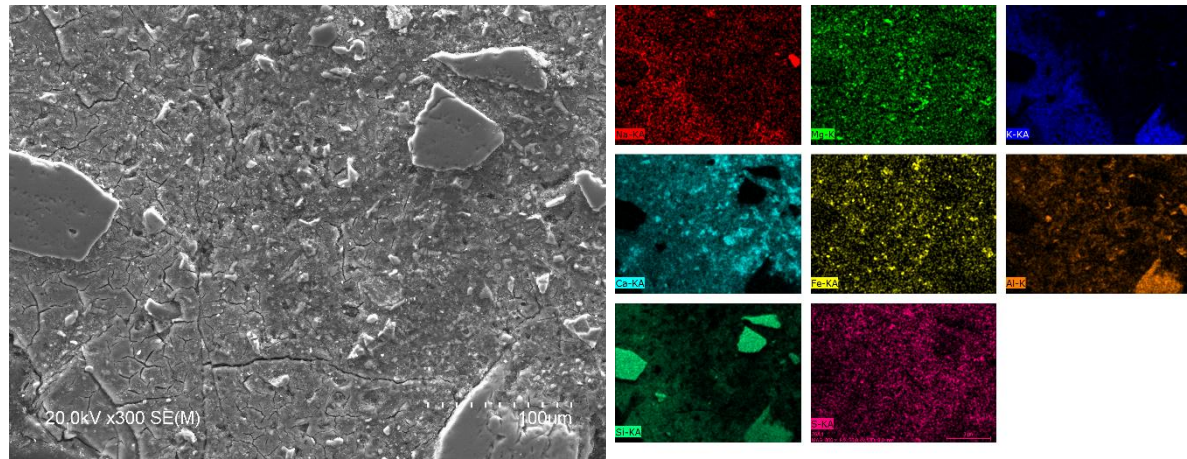


Figura 5.9. Productos de reacción árido-álcali en pasta, análisis y mapa de composición elemental asociado.

Para un correcto análisis microestructural las muestras deben ser representativas del hormigón de los testigos extraídos de la presa. Las muestras se embuten en resina de baja viscosidad, se cortan y se pulen, para obtener una superficie adecuada de observación y análisis.

5.4.3. Caracterización fisicoquímica

- **Difracción de rayos X:** Se determinan los principales compuestos cristalinos presentes en el hormigón. La Difracción de Rayos X está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. Las muestras se muelen y tamizan hasta obtener un tamaño de grano menor de 80µm. Posteriormente, las muestras en polvo se analizan utilizando un difractómetro.
- **Fluorescencia de rayos X:** Se realiza un análisis químico elemental de las muestras, expresándose los resultados como el óxido más estable. El análisis se realiza con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda. Para completar correctamente el análisis se determina el porcentaje de CO₂ mediante el ensayo de pérdida por calcinación descrito en la norma UNE-EN 196-2 (UNE, 2014).

5.4.4. Otras de técnicas de evaluación

En general, cuando en el hormigón se producen expansiones inferiores al 0,5 % por procesos ocasionados por reacciones álcali-sílice, la disminución de resistencia a compresión y a tracción indirecta del hormigón afectado se sitúa por debajo del 25 y del 30 %, respectivamente (Hobbs, 1987). Para expansiones mayores, la merma de prestaciones mecánicas puede llegar a ser muy superior.

No obstante, la *resistencia a compresión* no se considera un índice suficientemente fiable para evaluar el nivel de deterioro, dado que en las primeras etapas de formación de los geles

expansivos se suele producir un ligero incremento de resistencia, a medida que van colmatándose los poros por los productos de reacción. Esto mismo puede producirse en las fisuras tempranas ocasionadas por el proceso expansivo, de modo que al ir rellenándose estas fisuras con el paso del tiempo por la formación de nuevos geles puede quedar enmascarado el avance del proceso si su seguimiento se evalúa en función de la merma de resistencia a compresión.

En cambio, la determinación del *módulo de elasticidad del hormigón* y de la *velocidad de propagación de ultrasonidos* son indicadores más fiables que la evaluación de la resistencia a compresión, puesto que ya en las etapas iniciales del proceso se observa una disminución muy significativa (generalmente superior al 50 % para el módulo de elasticidad) en los valores obtenidos en ambos ensayos respecto al del hormigón original no degradado.

Otro parámetro muy útil puede ser la *determinación del módulo dinámico del hormigón*, que suele dar una información del avance del deterioro incluso más fidedigna que la velocidad de propagación de ultrasonidos, si bien al tener que ser efectuado sobre probetas testigo extraídas de la estructura resulta una clara desventaja respecto al uso del ensayo no destructivo (Bermúdez, 2008).

De todo lo anterior, se puede considerar que para la evaluación del deterioro mediante el control de las prestaciones mecánicas los ensayos que más información aportan son los de determinación del módulo de elasticidad en compresión y del módulo dinámico del hormigón.



Figura 5.10. Equipo de ultrasonidos.

5.4.5. Nivel de daño del hormigón

Hay varios métodos utilizados para determinar el nivel o grado de daño en el hormigón. A continuación, se describen dos de los métodos utilizadas habitualmente en las inspecciones de presas, el *Índice de Daño Relativo* (Grattan-Bellew, 1992 y Villeneuve, 2012), desarrollado en Norteamérica, y el *Nivel de Daño*, desarrollado en España (Menéndez, 2010b).

5.4.5.1. Índice de daño relativo (DRI) (Norteamérica)

Este método de ensayo DRI es una herramienta para evaluar los daños internos del hormigón debido a reacción árido-álcali de forma relativa, entre distintas zonas de hormigones similares.

Se han publicado dos variantes del método de evaluación del daño relativo, cuyas bases principales de cálculo son las mismas. La diferencia principal entre ambos está relacionada con las alteraciones del hormigón a observar y la ponderación por un peso relativo de estas.

El primer método aplicado es el publicado por Grattan-Bellew (1992). El segundo método aplicado es el de Villeneuve (2012), el cual propone una modificación del método original, incluyendo dos nuevos factores, aunque estos están ponderados a cero; lo que en la práctica hace que la valoración de daño relativo por ambas variantes sea igual. Estos métodos no están planteados para evaluar el ataque interno por sulfatos y se aplican comparativamente en distintas zonas de una estructura.

Con el fin de diferenciar e intentar separar los fenómenos relacionados con el daño por reacción árido-álcali y por ataque interno por sulfatos, y teniendo en cuenta cada uno de los factores asociados a los mecanismos de reacción, Menéndez (2017) propone, durante el desarrollo del proyecto PREXES, una modificación de la ponderación de los factores. Esta modificación está encaminada a obtener un DRI asociado a la reacción árido-álcali (DRI-RAA) y un DRI asociado al ataque interno por sulfatos (DRI-AIS). Para ello se da una valoración mayor a las alteraciones relacionadas con la formación de productos de reacción tipo gel, en el caso del DRI-RAA y una valoración mayor a las alteraciones relacionadas con la formación de fisuras o la presencia de productos que pudiesen estar relacionados con la formación de etringita, en el caso del DRI-AIS.



Figura 5.11. Muestra de hormigón preparada para realizar el DRI.

La valoración de los factores aplicados en cada uno de los métodos se ha normalizado, con el fin de obtener una ponderación de daño comparativo entre ellos. Los factores como las ponderaciones correspondientes se recogen en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Defectos observables y factores multiplicadores en cada método aplicado.

I		DRI	DRI	DRI	
		Grattan-Bellew (1992)	Villeneuve (2012)	Menéndez (2017)	
				DRI-RAA	DRI-AIS
1	Fisuras cerradas en partículas de árido grueso	0,25	0,25	1,49	0,80
2	Fisuras abiertas en partículas de árido grueso	2	2	1,86	1,61
3	Fisuras abiertas con productos de reacción en partículas de árido grueso	2	2	2,23	3,21
4	Fisuras en pasta de cemento sin productos de reacción	3	3	0,74	0,80
5	Fisuras en pasta de cemento con productos de reacción	3	3	3,73	4,01
6	Partícula de árido reaccionado	2	2	2,23	0,00
7	Árido despegado o desligado	3	3	0,74	0,80
8	Reacción en borde	-	0	1,49	2,41
9	Productos de reacción en poros de la pasta de cemento	-	0	0,74	1,61

5.4.5.2. Nivel de daño por reacción árido-álcali (DL-RAA) y por ataque interno por sulfatos (DL-AIS) (España)

Se analiza la distribución del daño por reacción árido-álcali y por ataque interno por sulfatos en base al nivel de daño determinado mediante estereomicroscopía y microscopía electrónica de retrodispersados combinada con microanálisis por energía dispersivas de rayos X. Esta metodología de ensayo necesita ser aplicada a un número de muestras suficientemente grande para que los resultados sean representativos del conjunto.

Se establece una gradación del daño en cinco niveles, tanto para el daño por reacción árido-álcali (DL-RAA), como para el daño por ataque interno por sulfatos (DL-AIS). Estos niveles comprenden desde la ausencia de daño (nivel 0) hasta un daño generalizado (nivel 5), según se recoge en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Calificación del nivel de daño por reacción árido-álcali y ataque interno por sulfatos.

<i>Codificación del daño (álcali-árido)</i>	<i>Nivel de daño</i>	<i>Codificación del daño (sulfatos)</i>
DL-RAA-0	Nulo	DL-AIS-0
DL-RAA-1	Bajo	DL-AIS-1
DL-RAA-2	Moderado	DL-AIS-2
DL-RAA-3	Medio	DL-AIS-3
DL-RAA-4	Elevado	DL-AIS-4
DL-RAA-5	Extendido al total	DL-AIS-5

Para definir cada uno de estos niveles de daño se han establecido las características asociadas con los productos formados, identificando los productos observados a nivel microestructural y definiendo la localización de estos productos en el material.

Microestructuralmente se pueden identificar diferentes tipos de productos de alteración y distribuciones típicas en las muestras de hormigón. Cada nivel de daño se define por los tipos de productos formados, la localización de los productos de reacción formados y la extensión de estos en la muestra analizada. Los niveles de daño consecutivos incluyen los productos y localizaciones del nivel de daño anterior más los nuevos productos y localizaciones definidos para ese nivel; es decir, los niveles de daño son acumulativos. En las Figuras 5.12 y 5.13, se

puede observar la evolución del daño por reacción árido-álcali y del daño debido a ataque interno por sulfatos.

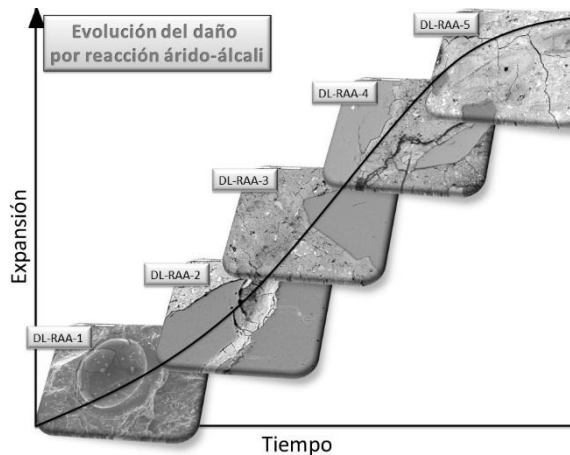


Figura 5.12. Evolución del daño interno por reacción árido-álcali.

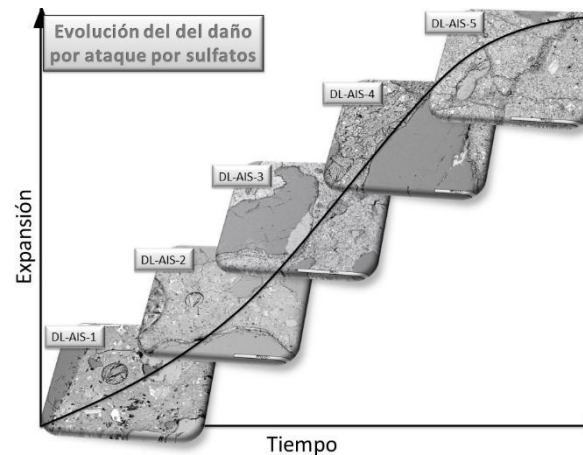


Figura 5.13. Evolución del daño interno por sulfatos.

5.5. Análisis de la información de ensayos complementarios de laboratorio

- **Análisis de información complementaria:** Además de las técnicas y estudios descritos, generalmente es útil la realización de análisis adicionales que pueden complementar el estudio sobre el hormigón, como analizar aguas, suelos o productos agresivos que pudieran estar en contacto con el hormigón de la estructura, determinando la composición química y propiedades fisicoquímicas de los mismos. También, se puede caracterizar el propio hormigón o productos formados en él, mediante otras técnicas o determinaciones fisicoquímicas, como porosimetría de intrusión de mercurio, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopia de infrarrojos, etc.
- **Integración de la información obtenida:** Una vez completada la identificación de los procesos expansivos de origen interno en el hormigón es necesaria la integración de estos resultados conjuntamente con la información obtenida en cada uno de los pasos anteriores, desde las observaciones efectuadas en la estructura hasta las realizadas en el análisis macro y mesoscópico de los testigos de hormigón para poder valorar la incidencia del fenómeno de alteración diagnosticado en el daño observado en la estructura y relacionarlo, cuando proceda, con las condiciones de exposición ambientales de esta.

5.6. Bibliografía

ACI 201.2R-08. (2008): *Guide to durable concrete*, Ed. American Concrete Institute

British Cement Association (1992): *The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction*, British Cement Association, 44 pp. ISBN 0 7210 1369 4

Bermúdez, M. A. y Alaejos, P (2008): “Ensayos de detección anticipada y control de los procesos de envejecimiento del hormigón”, en *VIII Jornadas Españolas de Presas (CNEGP-SPANCOLD)* Córdoba, 26-28 Nov 2008

- Brite-Euram Project 4062 (2001): *Manual for assessment of residual service life of reinforced concrete structures. Part 1. General approach and procedures*
- Brite-Euram Project 4062 (2001): *Manual for assessment of residual service life of reinforced concrete structures. Part 4. Structures affected by rebar corrosion*
- Gaspar Tebar, D. (1995): “Durabilidad del hormigón: Ataque por sulfatos”, en *Características y durabilidad de conglomerantes hidráulicos. XIII Curso de Estudios Mayores de la Construcción. CEMCO-95*
- Gil, A. (2011): *Valoración de la Resistencia Mecánica en la Presa de Chambón (Francia), afectada por reacción árido-álcali*, Comunicación verbal de los responsables técnicos de la presa de Chambón a Arturo Gil, de Iberdrola
- Grattan-Bellew, P. y Danay, A. (1992): “Comparison of Laboratory and Field Evaluation of AAR in Large Dams”, en *International Conference on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams, Canadian Electrical Association & Canadian National Committee of the ICOLD*, New Brunswick
- Hobbs, D. W. (1987): “Some test on fourteen years old concrete affected by the alkali silica reaction”, en *Proc. 7th Int. Conf. Concrete alkali-aggregate reactions*, Ottawa, Canada. 18-22 Aug. 1986. Noyes Publications, pp. 342-346
- Hobbs, D.W. (1988): *Alkali-silica reaction in concrete*. Ed. Thomas Telford, London (England)
- L.P.C. (1997): *Technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton*, Méthode d'essai LPC n° 47, pp. 1-14. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC). IFSTTAR
- Marie Victoire, E. (1996): *Les altérations visibles du béton. Définitions et aide au diagnostic*. Cercle des partenaires du Patrimoine, Champs sur Marne
- Menéndez, E. (1995): “Durabilidad del hormigón: Reacción álcali-árido. Características y durabilidad de conglomerantes hidráulicos”, en *XIII Curso de Estudios Mayores de la Construcción, CEMCO*
- Menéndez, E. (1996): “Patología de los Materiales. Ataques por Agentes Químicos y Biológicos en el Hormigón de Cemento Portland”. *Curso sobre Patología de Hormigón. Instituto Técnico de la Construcción*. Barcelona
- Menéndez, E. (2010a): *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ISBN: 978-84-89702 (Autorizado por Esperanza Menéndez, propietaria del @)
- Menéndez, E. (2010b): *Generación, modelización y análisis no destructivo de degradación en materiales compuestos. Aplicación a reacciones expansivas internas en hormigón*, Ph.D. E. Menéndez, ETSITT, Universidad Politécnica de Madrid. Open Access [10.15866/irea.v7i1.17185](https://doi.org/10.15866/irea.v7i1.17185)
- Menéndez, E. (2011) *Evaluation and gradation of simultaneous damage in concrete affected by alkali-silica reaction and sulfate attack*, International review of civil engineering (IRECE), pp. 99-106
- Menéndez, E., García-Rovés, R. y Prendes, N. (2015): “Damage assessment of dams affected by expansive reactions using stereomicroscopy and electron microscopy: Relationship between the damage levels DRI and DL”, en *Second International Dam World Conference*, pp. 1-10. Ed. LNEC
- Menéndez, E. (2017): “Modificación del índice de daño relativo para la evaluación de la reacción árido-álcali y el ataque interno por sulfatos (DRI-RAA y DRI-AIS)”. Proyecto PREXES
- Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transport et de la Mer (1994): *Recommandations provisoires pour la prévention des desordres dus l'alkali-reaction*. LCPC, París (France)
- Mullick, A.K. y Chandra, S. (1992): “Physic-chemical, biological and thermal degradation including environmental effects”, en *9th International Congress on the Chemistry of Cement*. New Delhi, India
- Palmer D. (1988): *The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction. Report of a working party*. British Cement Association. ISBN: 0721013694
- UNE-EN 196-2:2014 (2014): “Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos”, UNE
- Vayda RJ, Simons JW, Moroney JE, Bayrak O, Keating RB. (2012): *Seabrook Station: Impact of Alkali-Silica Reaction on Concrete Structures and Attachments*. Alexandria (VA): MPR Associates Incorporated
- Villeneuve, V., Fournier, B. and Duchesne, J. (2012): “Determination of the Damage in Concrete Affected by ASR—the Damage Rating Index (DRI)”, en *14th ICAAR, International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Austin (Texas)

6. Modelización

6.1. Modelos estadísticos de los datos de auscultación

El tratamiento estadístico de los datos de auscultación de las presas tiene como finalidad extraer de la amplia –y creciente– masa de datos registrados durante la construcción y explotación de esas estructuras la información inteligible que permita comprobar que su comportamiento, a lo largo del tiempo, es acorde a las previsiones del proyecto y, por tanto, que se mantienen los niveles de seguridad estipulados por la normativa.

El resultado de esta metodología será un conjunto de modelos numéricos capaces de relacionar la evolución de determinadas variables externas (o independientes) con la respuesta de la estructura, caracterizada generalmente por movimientos –absolutos o relativos– de diferentes puntos, sin excluir otros parámetros como filtraciones, etc.

A diferencia de otros campos, como el econométrico, que comparten estas técnicas, las relaciones entre las *acciones* y la *respuesta* obedecen en este caso a leyes físicas conocidas y contrastables experimentalmente, aunque no expresables de manera inmediata mediante relaciones funcionales directas aplicables al conjunto sino, generalmente, a porciones infinitesimales y siempre a través parámetros propios del material (módulo de elasticidad, resistencia, conductividad y calor específico, densidad, etc.).

A pesar de que los modelos estadísticos no utilizan, como los *modelos estructurales* que a continuación se tratan, las leyes físicas subyacentes, es de una gran ayuda en su construcción el conocimiento de estas. Además, son un elemento imprescindible en la calibración y validación de aquéllos ya que, al desagregar la contribución de las acciones individuales independientes en la respuesta conjunta, permiten el ajuste por separado de los parámetros característicos de los materiales, tanto en el campo mecánico como térmico, separando finalmente la componente irreversible atribuible, en su caso, a los fenómenos expansivos. Por ejemplo, pueden ayudar a discernir si la componente expansiva es de desigual intensidad en los distintos bloques de la presa.

Finalmente, otra aplicación no menos importante de los modelos estadísticos es su utilización como elementos de control de la estructura. En efecto: una vez construido y validado un modelo podrá emplearse en etapas posteriores para comprobar si las respuestas reales de la estructura caen dentro del rango -con los límites de probabilidad asociados- de las previstas por los modelos; en caso contrario, sería una indicación de que se ha producido un cambio que requerirá una reevaluación con los modelos estructurales en relación con la seguridad.

El conjunto de datos proporcionado por los sistemas de auscultación son series de valores, generalmente discretas, registradas a lo largo del tiempo a intervalos no siempre equiespaciados e, incluso, con densidad variable de datos a lo largo de los años.

El tratamiento de este tipo de datos puede realizarse, básicamente, mediante dos aproximaciones: la más clásica metodología de la *regresión multilínea* como, por ejemplo,

Draper y Smith (1966) o Maddala (1977) y la metodología de *series temporales (modelos autorregresivos y de media móvil)*, desarrollada principalmente por Box y Jenkins (1976).

6.1.1. Modelos de regresión multilínea y variables explicativas

Los modelos de regresión multilínea tratan de explicar la variación de la variable a estudiar, generalmente un movimiento Y_t en el instante t en función de los valores de otras variables (independientes de la estudiada) tanto en el instante considerado como en los anteriores. En este caso, las variables relevantes serían: la evolución del nivel del embalse Z y las temperaturas T_a y T_w del aire y del agua embalsada.

Ambos tipos de variables ambientales son fácilmente registrables, pero tienen en común que oscilan, de modo más o menos periódico, en torno a un valor medio, pero, sobre todo, que están acotadas superior e inferiormente, lo que las inhabilita para explicar por sí mismas movimientos no recuperables o acumulativos, teniendo en cuenta que las hipótesis de diseño y el comportamiento habitual de la estructura tienen lugar fundamentalmente en el ámbito elástico y lineal.

Una manera de soslayar este problema es la introducción de otras variables instrumentales dependientes directamente del tiempo t que, si en el proceso de ajuste obtienen valores estadísticamente significativos para sus coeficientes, permitirán constatar -y cuantificar- la existencia de una componente no recuperable subyacente en la evolución de los movimientos.

De una manera sintética, se plantea la obtención de modelos aditivos de la forma:

$$Y_t = a + f_1(t) + f_2(Z) + f_3(T_a) + f_4(T_w) + \varepsilon_t \quad \text{Ec. 1}$$

Donde a es una constante de ajuste, dependiente de los niveles medios y unidades de las variables involucradas, y ε_t una función que representa el error de la estimación, también llamada *residuo*. Se adelanta aquí que el ajuste solo será correcto si los residuos resultantes son una función aleatoria en el tiempo, es decir si se trata de un *ruido blanco* (un proceso estocástico es *ruido blanco* si es de media nula, varianza constante y sin autocorrelación; es decir, no se puede predecir a partir de su pasado).

En las funciones f_2 a f_4 se ha omitido intencionadamente el subíndice tiempo porque la dependencia no es necesariamente con el instante de la observación Y_t sino también -y a veces con mayor importancia- con instantes anteriores de las variables dependientes. En los apartados siguientes se dan algunas pautas para la selección y tratamiento de las variables a ser introducidas en los modelos a partir de los datos registrados por los sistemas de auscultación.

6.1.1.1. Nivel de embalse

Habitualmente, la variable recopilada es la cota absoluta del embalse (en m.s.n.m.) a lo largo del tiempo. Es evidente que esta variable está claramente acotada entre la cota más baja de la cimentación -o del desagüe de fondo- y el máximo nivel normal o extraordinario, según el caso (este último valor asociado a una probabilidad próxima, pero inferior, a la unidad).

Por otro lado, es conocido que, independientemente del tipo de presa, la relación entre el nivel de embalse –para todo su rango– y el movimiento horizontal máximo de la coronación es, *ceteris paribus*, claramente no lineal: en presas de gravedad puede aproximarse con una función polinómica de tercer grado, mientras que en presas bóveda puede requerir polinomios de mayor grado al darse la circunstancia –en ocasiones– que el máximo movimiento no se corresponde con la máxima cota al entrar en juego las rigideces relativas de los arcos a distintas alturas.

Una manera de introducir estas relaciones polinómicas es construir nuevas series con los cuadrados, cubos, etc. de la cota de embalse y realizar un ajuste conjunto por pasos (*stepwise regression* en la denominación anglosajona) que tomará o dejará de manera automática aquellas potencias que sean significativas juntamente con el resto de las variables en juego. A este respecto, conviene indicar que es muy conveniente para evitar problemas numéricos sustituir las variables originales (en este caso la cota absoluta, Z_t) por otra relativa como, por ejemplo, el descenso del embalse desde su máximo teórico o nominal $z_t = Z_t - Z_{max}$ o, mejor, la cota normalizada $\zeta_t = (Z_t - Z_{min}) / (Z_{max} - Z_{min})$.

Por ejemplo, la flecha en el extremo de una ménsula elástica empotrada, de sección constante, sometida a carga triangular, con valor máximo en el empotramiento, y variable desde este al extremo (que podría ser una idealización elemental del llenado de una presa de gravedad) tiene solución analítica exacta de la forma de polinomio de 4º orden con dos términos: $f(\zeta) = a\zeta^4 + b\zeta^3$, siendo ζ la cota normalizada desde la base, y las constantes a y b dependen de la sección y del módulo de elasticidad.

Esta función podría ser ajustada estadísticamente con bastante aproximación mediante un polinomio de 2º grado, como se muestra en la Figura 6.1 –línea y ecuación naranjas–, en la que los cuadrados azules simulan registros de la flecha relativa para distintas alturas de agua. Se ha incluido también -en azul- la línea y ecuación por mínimos cuadrados de un polinomio de 4º orden que, lógicamente, reproduce el que sirvió para crear los puntos, con coeficiente de correlación unitario y coeficientes nulos en los términos lineal y 2º grado.

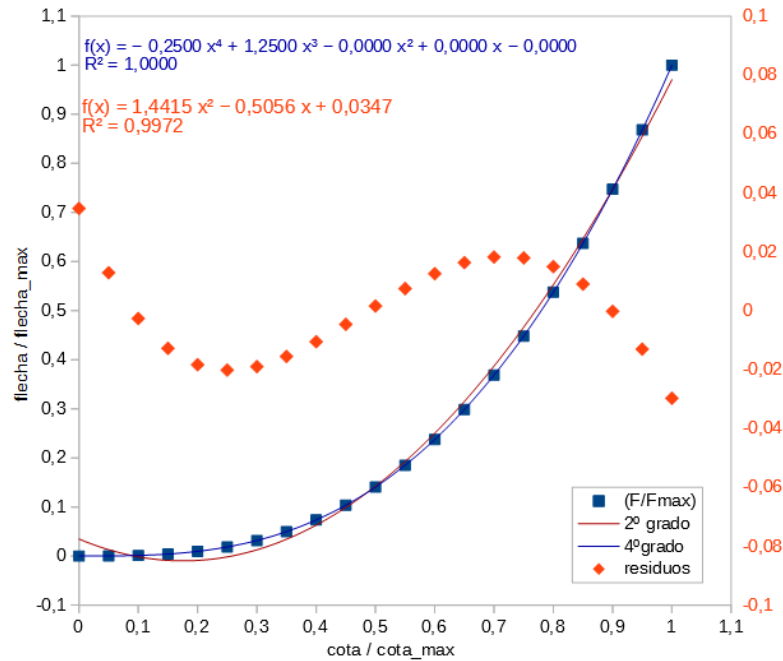


Figura 6.1. Ajuste de la función ideal de llenado de una presa de gravedad

El ajuste parabólico tiene buen aspecto visual y su coeficiente de correlación es muy elevado, pero, si se examinan sus residuos (diamantes naranjas, referidos a la escala derecha), se observan no solo errores del 4% en los extremos sino, sobre todo, una gran estructura en ellos, es decir, no se trataría en absoluto de *ruido blanco*, sino de una parte sistemática del movimiento no recogida por el ajuste.

Esta formulación bastaría para recoger la denominada deformación elástica instantánea, sin embargo, para tener en cuenta otras diferidas puede ser conveniente ensayar con funciones desplazadas como Z_{t-k} con $k = 1, 2, 3$ dependiendo del lapso entre lecturas en relación con el desarrollo temporal de los fenómenos de deformación elástica diferida o de fluencia, etc.

Igualmente, en ocasiones puede considerarse como candidata una nueva función que recogiese el posible efecto de cambios rápidos del nivel de embalse, una función de diferencias: $\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$ bien en el mismo instante o con algún desfase.

6.1.1.2. Temperaturas

Los movimientos de la presa debido a las oscilaciones térmicas son el resultado de un proceso dinámico complejo en el que intervienen la geometría y orientación de la estructura, las frecuencias de los ciclos térmicos –diarios, anuales– y un amplio conjunto de propiedades del material, tanto térmicas (conductividad, calor específico, densidad) como mecánicas (coeficiente de dilatación lineal, módulo de elasticidad, etc.).

El problema térmico fue planteado –y resuelto– por Fourier (1882) mediante una ecuación en derivadas parciales que relaciona la derivada de primer orden de la temperatura respecto al tiempo con las de segundo orden respecto al espacio:

$$\partial \theta / \partial t = (k / c \rho) \cdot (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2 + \partial^2 \theta / \partial z^2) \quad \text{Ec. 2}$$

cuya integración en un caso general es muy complicada debido a la particularidad de las condiciones de contorno y geométricas de la presa, pero perfectamente abordable por el método de elementos finitos.

El clásico libro de Stucky y Derrón (1957) proporciona también resultado de gran valor por integración de la ecuación de Fourier en condiciones ideales pero muy representativas del juego térmico en las presas. Resulta interesante recoger dos resultados del estudio más elemental: la distribución de temperaturas en un muro semi-infinito cuya cara exterior está sometida a una oscilación térmica periódica:

$$\theta_0(t) = \bar{\theta}_0 + A_0 \cdot \cos(\omega t) \quad \text{Ec. 3}$$

de periodo $T = 2\pi/\omega$, amplitud A_0 y temperatura media $\bar{\theta}_0$. La temperatura en un punto a una distancia x del paramento sería:

$$\theta(x, t) = \bar{\theta}_0 + A_0 e^{-\mu x} \cos(\omega t - \mu x) \quad \text{Ec. 4}$$

es decir, la amplitud se amortigua exponencialmente con la distancia y el desfase aumenta linealmente con la misma, ambas a través del parámetro $\mu = \sqrt{\pi/aT}$ inversamente proporcional al periodo de la oscilación y a la difusividad, a (si k , c y ρ son constantes en todo el volumen y tiempo, el parámetro determinante es la difusividad: $a=k/c\rho$). Esta solución permite hacerse una idea del efecto de los distintos ciclos térmicos: para un valor medio de la difusividad de hormigones de presa $a = 0,004 \text{ m}^2/\text{h}$ resulta un parámetro $\mu = 5,7 \text{ m}^{-1}$ para las variaciones diarias y $\mu = 0,3 \text{ m}^{-1}$ para las variaciones anuales de temperatura. De ahí se sigue que las variaciones diarias se amortiguan al 10% de su amplitud a una distancia de la superficie de 40 cm, mientras que las anuales requieren una profundidad de 7,7 m, con unos desfases de 9 horas y 134 días, respectivamente.

La situación real es muchísimo más compleja en el sentido de que cada punto está afectado no solo por una distancia única a una sola superficie (al menos se superponen las distancias mínimas a los dos paramentos—) sino, además, por un conjunto de frecuencias de oscilación de la temperatura ambiente más allá de la diaria y la anual.

Sin embargo, la anterior aproximación analítica permite extraer una consecuencia muy importante: la frecuencia de oscilación térmica de un punto interior de la presa es la misma que la de la temperatura en su frontera, aunque amortiguada y desfasada. De aquí se sigue que en la búsqueda de las funciones de ajuste de temperaturas puede resultar de interés realizar un análisis espectral o descomposición en series de Fourier para encontrar frecuencias predominantes, que indudablemente existen en todos los emplazamientos, y que tendrán su reflejo en los movimientos de la presa, permitiendo desagregarlas —con mayor interés las de duración superior al año en casos de movimientos irreversibles— del movimiento conjunto.

Habitualmente las series de temperaturas disponibles son las diarias en cuanto a la temperatura ambiente –y a la media diaria o, más habitualmente, las extremas diarias– y, en ocasiones, la semanal o mensual del embalse a distintas profundidades. Hay ocasiones con datos directos del interior de la presa mediante termopares *ad hoc* o formando parte de algún otro dispositivo empotrado.

Es claro que en la mayoría de las presas el *ciclo* anual será el predominante pero no resulta inmediato transformar las series diarias arriba indicadas en una serie o series con el desfase –o desfases– apropiados para correlacionar bien con los movimientos registrados. Un procedimiento habitual es *suavizar* las series de temperaturas diarias (que habitualmente tienen grandes oscilaciones, no seguidas por los movimientos) mediante la técnica de la media móvil simple o ponderada. Sea cual fuere el procedimiento, las nuevas series deben construirse escogiendo su *amplitud* en el tiempo para que el aplanamiento no sea excesivo, y el *desfase*, definido como el ‘centro’ de la nueva serie respecto al día de observación de la serie a explicar. Las nuevas series a construir a partir de las series diarias como candidatas al ajuste serían:

$$\bar{\theta}_{t,k} = \frac{1}{n-m} \sum_{j=m}^n \theta_{t-j} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo $k = (m + n)/2$ el desfase, con $n > m$. Cuando $m = 1$ estamos en una influencia más próxima, lo que ocurrirá en estructuras más esbeltas; con $m \gg 1$ se examinan situaciones con mayor inercia, generalmente en presas más masivas. Los modelos analíticos térmicos como los mostrados por Stucky y Derron pueden dar una idea del valor máximo de ese desfase para las distintas frecuencias representativas de la serie real.

Prürer y Steiner (1986) aplicaron este método a la esbelta presa bóveda de Kops (Austria), de 122 m de altura, encontrando significativos los valores instantáneos de la cota hasta la 4ª potencia, la cota media de los 20 días anteriores a la observación y entre el día 47 y 66, y dos medias móviles de la temperatura: de los 26 días anteriores, y otra entre los días 27 y 52.

Una última observación es que, a pesar del efecto muy *de piel* de la oscilación diaria (y por tanto con inapreciable contribución al movimiento en estas estructuras), en ocasiones puede ser significativo incluir entre los candidatos la serie diaria debido a una posible incidencia de la temperatura local en el propio proceso de la toma de datos, especialmente si esta se realiza mediante procedimientos ópticos. En ese sentido, se considera generalmente mejor la serie de temperaturas máximas que la de medias diarias, aunque el propio proceso de ajuste indicará si son o no estadísticamente significativas (en el mencionado modelo del Dr. Prürer, no resultó significativa la temperatura diaria).

6.1.1.3. Evolución en el tiempo

Cuando los modelos con variables explicativas *ambientales* como las descritas en los párrafos anteriores son incapaces de eliminar tendencias sostenidas en la serie analizada, es decir, cuando los residuos de tales ajustes no son –por lo menos– estacionarios se hace necesario introducir nuevas variables que acomoden esa evolución temporal.

Es cierto que el nivel de embalse y la temperatura pueden tener fluctuaciones de ámbito hiperanual que se traducirían en cambios de nivel de la variable dependiente pero que retornarían a largo plazo a un valor medio estable, lo que implica ciclos de progresión y de regresión. Cuando faltan estos últimos se está en presencia de fenómenos de carácter irreversible como los generados por procesos expansivos.

Puesto que no hay registros directos de la actividad expansiva (la incorporación a los sistemas de auscultación de extensómetros de varillas, etc. incluso con elementos correctores no es registro directo de la expansión) o, como mucho, son de comienzo muy tardío, es útil la utilización de variables explicativas adicionales que dependientes directamente del tiempo.

La formulación más elemental es suponer una variación lineal del fenómeno. Esta aproximación, de muy fácil implementación añadiendo a las otras variables explicativas una serie construida por el tiempo transcurrido desde un origen arbitrario –pero común para todas las series– hasta el día de cada observación, presenta por lo menos dos limitaciones metodológicas: a) implica que el fenómeno comienza de manera brusca en un instante preciso del tiempo y; b) progresa indefinidamente en el futuro, sin permitir amortiguamiento ni finalización alguna.

Hay dos caminos de mejora para superar las limitaciones apuntadas; ambas se basan en utilizar funciones que permitan cambios de tendencia variables en el tiempo, bien de manera suave y continua o bien de manera discontinua en instantes concretos. Se trata, en definitiva, de funciones cuya derivada segunda respecto al tiempo no sea nula en todo el periodo de observación como el ajuste lineal con el tiempo.

La evolución progresiva de las tendencias resulta, en principio, más acorde con los modelos fisicoquímicos de expansión del hormigón y pueden ser bien representados por funciones tipo “S”. Las funciones de la segunda especie, con primeras derivadas discontinuas, pueden ser necesarias igualmente cuando bien el propio fenómeno expansivo, u otros de distinto origen, hayan producido cambios estructurales, no necesariamente drásticos, que se materializan a partir de instantes específicos, y que suponen una respuesta ligeramente diferente a las acciones ambientales.

Funciones temporales con derivada continua

Existen muchos tipos de funciones para representar la evolución suave, continua y de larga duración asociada a fenómenos expansivos, que se pueden agrupar bajo el término de ‘logísticas’ o modelos de Verhulst (1838) (Pierre-Francois Verhulst (1804-1849), matemático belga que presentó la ecuación logística como modelo de crecimiento de la población humana). Todas ellas se caracterizan por: un primer tramo de pequeño, aunque progresivo crecimiento; un tramo central de fuerte crecimiento en el que la pendiente (velocidad de crecimiento) alcanza su máximo y; un amortiguamiento final progresivo hacia un valor máximo asintótico.

Una de estas funciones, basada en una variación de la función logística, es la propuesta por Ulm et al. (2000), descrita más adelante, en el apartado 6.2.2 relativo a los modelos mecánicos para el análisis estructural. Su inclusión en los modelos estadísticos sería muy conveniente al facilitar la identificación directa de parámetros para el conjunto de la estructura en el supuesto

que la dependencia de la temperatura ya haya sido desagregada. Sin embargo, su no linealidad con el tiempo impide incluir a este como variable explicativa directamente, lo que nos llevaría a métodos de regresión no paramétrica.

Se pueden utilizar, sin embargo, otras funciones con forma de “S” susceptibles de ser linealizadas para el ajuste respecto al tiempo como $y(t) = \bar{Y}(t) + \varepsilon(t)$, siendo la función pronóstico:

$$\hat{Y}(t) = y_0 + L \frac{1}{1+a \cdot b^t} \quad \text{Ec. 6}$$

Además de los parámetros específicos de los ajustes a y b , denominados habitualmente *parámetros de forma y de escala*, la características de las series a analizar obligan a estimar otros dos: L representa la amplitud máxima del movimiento irreversible y multiplica a todas las funciones básicas, cuya oscilación habitual es entre 0 y 1; y_0 se hace necesario cuando el inicio de cada serie de medidas es posterior al del comienzo del fenómeno irreversible y representa directamente el movimiento irreversible, no registrado, que haya podido producirse hasta entonces.

La anterior función puede ser linealizada mediante una reorganización de la ecuación seguida de una toma de logaritmos neperianos y un cambio de la variable dependiente de y a η :

$$\eta = \ln\left(\frac{L}{y-y_0} - 1\right) \quad \text{Ec. 7}$$

con lo que la ecuación original se transforma en:

$$\eta = \ln(a) + \ln(b) \cdot t = \alpha + \beta \cdot t \quad \text{Ec. 8}$$

que permite un ajuste lineal de esa nueva variable η respecto al tiempo t , con coeficientes de ajuste α y β . Resulta inmediata la obtención de $a = e^\alpha$ y $b = e^\beta$ y de ahí la función de predicción.

El inconveniente de este procedimiento es que la transformación de la variable dependiente impide incluir conjuntamente en la regresión el resto de las variables explicativas, pero puede ser de utilidad para una primera estimación de carácter general del movimiento total esperable con carácter irreversible, así como para comprobar si hay señales de amortiguamiento de los mismos o de cambios de tendencia.

Las funciones temporales con derivada discontinua, que se examinan a continuación, sí permiten la evaluación simultánea de todas las variables explicativas: ambientales y temporales.

Funciones temporales con derivada discontinua

La utilización de este tipo de funciones no es solo un recurso numérico para conseguir un mejor ajuste: pueden estar recogiendo cambios estructurales reales que se manifiestan cuando se han alcanzado determinados umbrales de deformaciones internas que impliquen fisuración o agrietamiento no recuperables que hayan modificado la rigidez de la estructura (la relación entre acciones y movimientos) o de alguna de sus partes. Bajo esos supuestos de no linealidad

de la respuesta, son posibles ciclos con histéresis que tiendan a acumular cada año una pequeña parte del movimiento debido a la onda térmica anual.

La modelización de cambios del nivel o de la tendencia de respuesta a partir de determinados instantes localizados puede hacerse mediante las denominadas *dummy variables*, dependientes, en este caso, del tiempo. Estas se construyen creando series con pautas de generación distintas antes y después del instante de corte, que debe conocerse o estimarse o tantearse previamente.

Así, cuando se sospecha que en un instante t_k ha habido un salto brusco de nivel, pero manteniéndose la tendencia (pendiente), se podrían realizar ajustes separados para antes y después del salto de acuerdo con las ecuaciones (se omiten las variables ambientales y los términos de error para mayor claridad):

$$y_1 = a_1 + b \cdot t \quad \text{para } t \leq t_k \quad \text{Ec. 9a}$$

$$y_2 = a_2 + b \cdot t \quad \text{para } t > t_k \quad \text{Ec. 9b}$$

pero ambas ecuaciones pueden combinarse en la siguiente:

$$y = a_1 + (a_2 - a_1)D + b \cdot t \quad \text{Ec. 10}$$

siendo D la nueva variable *dummy* formada por una serie de ceros y unos: $D = 0$ para $t \leq t_k$ y; $D = 1$ para $t > t_k$.

Una vez realizado el ajuste -incluyendo el conjunto de variables- el coeficiente obtenido para la variable D será, precisamente, el salto producido en t_k .

De modo similar, se pueden utilizar variables *dummy* para recoger cambios de tendencia. Si el momento del quiebro es t_k , las ecuaciones de ajuste antes y después serían:

$$y_1 = a_1 + b_1 \cdot t \quad \text{para } t \leq t_k \quad \text{Ec. 11a}$$

$$y_2 = a_2 + b_2 \cdot t \quad \text{para } t > t_k \quad \text{Ec. 11b}$$

en las que son distintos tanto los términos independientes como las pendientes. Ambas ecuaciones se pueden estimar conjuntamente para todo el ámbito temporal y de variables explicativas, añadiendo dos nuevas variables *dummy*, como sigue:

$$y = a_1 + (a_2 - a_1)D_1 + b_1 \cdot t + (b_2 - b_1)D_2 \quad \text{Ec. 12}$$

siendo

$$D_1 = 0 \quad \text{para } t \leq t_k; \quad D_1 = 1 \quad \text{para } t > t_k$$

$$D_2 = 0 \quad \text{para } t \leq t_k; \quad D_2 = t \quad \text{para } t > t_k$$

El coeficiente de ajuste de D_1 proporcionará la diferencia de los términos independientes y el de D_2 la diferencia de las pendientes entre ambos tramos, y ambos juntamente con el resto de las variables explicativas.

Esta técnica puede emplearse también, por ejemplo, De Blas (1989), para realizar una aproximación a la función logística mediante una sucesión de funciones lineales a trozos, con charnelas de conexión sin continuidad en las derivadas primeras, que ya permite –por su linealidad– la inclusión en el modelo de las variables explicativas ambientales para su estimación conjunta.

6.1.2. Modelos autorregresivos y media móvil

Los modelos de series temporales han sido utilizados con notable éxito en diversos campos de la economía, fianzas, producción industrial o demanda, p.e. Cancelo, Espasa y Grafe. (2008), en que los que el conjunto de *agentes* que condicionan la respuesta es excesivamente grande, o no completamente conocido, y que, sin embargo, la propia serie a estudiar contiene información suficiente para explicar la mayor parte de su estructura y predecir su comportamiento futuro.

Los modelos de este tipo se basan en que una parte importante del comportamiento de una variable en un determinado instante está muy relacionada con los valores que tuvo anteriormente: modelos AR(p) o *autorregresivos*; con las diferencias pasadas entre respecto a su comportamiento esperado según el modelo y su valor real: modelos MA(q) o de *media móvil*; una combinación de ambos: ARMA(p,q); o, finalmente, una combinación de ambos acompañada de ciertos grados de diferenciaciones previas: modelos ARIMA(p,d,q), cuando, como ocurre con frecuencia, la serie a estudiar no es estacionaria (Una serie es estacionaria cuando todas las variables del proceso tienen la misma media $E(Y_t)=\mu$ y varianza $var(Y_t)=\sigma^2$, y la correlación entre dos de ellas depende solo de su distancia temporal $corr(Y_t, Y_{t-k})=corr(Y_{t+j}, Y_{t+j-k})$).

Todos los modelos enumerados son modelos *univariantes*, en el sentido de que solamente interviene la propia serie a estudiar a través de p de sus valores pasados, de q de sus diferencias entre el modelo y su realización (innovaciones) y del máximo orden d de diferenciación de la serie original para transformarla en estacionaria. La formulación general de un modelo ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) sería:

$$\Phi_p(L)(1-L)^d Y_t = \theta_q(L) a_t \quad \text{Ec. 13}$$

donde: L es el operador de retardos ($LY_t = Y_{t-1}$); Φ es un polinomio de orden p en L cuyos coeficientes Φ_j multiplican, respectivamente, a valores anteriores de la variable Y_{t-j} (y/o sus diferencias hasta el orden d), y θ es otro polinomio de orden q en L cuyos coeficientes θ_k multiplican a los valores a_{t-k} de las *innovaciones* anteriores.

Es evidente que la investigación de los procesos en estructuras con expansión lleva directamente, por su propia naturaleza no estacionaria, a modelos integrados que, por lo mismo, exigen diferenciación de la serie lo que es un inconveniente en muchos casos, puesto que los datos raramente están equiespaciados en el tiempo. No obstante, si los intervalos no son excesivamente diferentes, esta metodología (Sustituyendo, incluso, las diferencias (ΔY_t) por las derivadas ($\Delta Y_t/\Delta t$), etc.) puede ser más potente que los modelos de regresión descritos,

de naturaleza determinista, y que requieren una hipótesis fija sobre la forma de crecimiento, como puede verse al considerar esos tres tipos de modelos siguientes, en los que se ha prescindido de los eventuales factores estacionales

$$Y_t = a + bt + n_{1t} \quad \text{Ec. 14a}$$

$$\Delta Y_t = \mu + n_{2t} \quad \text{Ec. 14b}$$

$$\Delta^2 Y_t = n_{3t} \quad \text{Ec. 14c}$$

siendo $\Delta = (1 - L)$ el operador diferencia y los términos n_{jt} ($j=1,2,3$) modelos estacionarios ARIMA con media cero. El primero de ellos sería un ajuste completamente determinista como los expuestos en el apartado anterior (en este ejemplo con una tendencia lineal), en la que el ajuste permite determinar la pendiente b de manera rígida en función de los datos existentes hasta el momento e incluyendo a las medias de las variables involucradas. En el extremo opuesto están los modelos del tercer tipo en los que el crecimiento a largo plazo es aleatorio y, por tanto, puede ir adaptándose por sí mismo a la aparición y evolución de la componente expansiva. La opción por el segundo o el tercero tiene implicaciones técnicas que exceden el alcance de este trabajo, véase Espasa y Cancelo (1993), Cap.2.

La metodología Box-Jenkins (1976) proporciona excelentes herramientas cuantitativas y procedimientos para la construcción, identificación y validación de los modelos, así como para el tratamiento previo de las series hasta hacerlas estacionarias (de media constante a lo largo del tiempo) y homocedásticas (de desviación también constante en el tiempo). El excelente libro de estos autores dedica dos de sus cuatro partes a los diversos tipos de modelos estocásticos univariantes, una tercera parte a modelos de función de transferencia (variables explicativas) y una cuarta parte en que aplica la combinación de los dos anteriores al diseño de esquemas de control, en el sentido de procesos industriales, o equivalentes, en los que se busca el efecto de actuar sobre determinadas variables para alterar la respuesta de las dependientes, no el descrito arriba.

Los modelos univariantes serían capaces de extraer de la señal analizada, de manera simultánea, los componentes ‘estacionarios’, causados por las acciones exógenas junto con la componente irreversible. Sin embargo, a diferencia de las series económicas en las que no siempre se dispone de variables explicativas y en muchos de los casos estas no son claramente exógenas, en los modelos de comportamiento estructural, no podemos prescindir de la información que proporcionan las series de cota y temperaturas ya citadas. Su incorporación a los modelos estocásticos se realiza incorporando a los modelos ARIMA funciones de transferencia de esas variables (Espasa y Cancelo, 1993, Cap.3):

$$Y_t = \sum_{j=1}^m X_{jt}^* + N_t \quad \text{Ec. 15}$$

En donde $X_{jt}^* = v_j(L)X_{jt}$ es la contribución de las variables explicativas exógenas X_j (en este caso las cota y temperatura) a través de un filtro estacionario, y $N_t = \frac{\theta_q(L)}{\phi_{p+d}(L)} a_t$ es la perturbación producida por la innovación a_t a través de un filtro no estacionario, que recogería la componente irreversible.

Debe resaltarse que esta formulación lleva implícito los retrasos que se discutieron en los modelos de regresión para cota y , sobre todo, temperaturas afectando a la variable sin diferenciar, mientras que los parámetros de ajuste de la componente N_t incluirían las componentes irreversibles.

6.2. Modelos constitutivos

Los modelos constitutivos establecen relaciones entre variables del estado del material, de manera que caracterizan el comportamiento de este. El presente apartado consta de tres subapartados: los posibles marcos o escalas de abstracción en los que se formulan los modelos constitutivos se describen en el primero de ellos; los comportamientos directamente relacionados con la reacción química se comentan en el segundo; y finalmente la descripción de los comportamientos puramente mecánicos es el objeto del último.

6.2.1. Escalas de aproximación

La modelización numérica de los fenómenos expansivos del hormigón tiene como objeto predecir el comportamiento futuro de las presas afectadas y anticipar las consecuencias de posibles medidas de mitigación.

El fenómeno expansivo involucra distintos campos físicos generalmente acoplados:

- Reacción química expansiva
- Difusión de los reactivos y productos de la reacción
- Distribución de la temperatura y de la humedad
- Distribución de la presión intersticial
- Comportamiento mecánico *reológico* (dependiente del tiempo) del esqueleto sólido

Se trata por tanto de un problema *multifísico* que además involucra distintas escalas. Aunque la distinción entre ellas es relativa, en nuestro contexto es conveniente la siguiente:

- a) En la *microescala* tienen lugar las reacciones químicas entre distintas sustancias.
- b) La *mesoescala* considera la estructura formada por materiales distintos (áridos, cemento, gel...), incluyendo también poros y microfisuras.
- c) La *macroescala* representa el comportamiento del hormigón homogeneizando sus constituyentes como si de un único material continuo se tratase.

El comportamiento macroscópico puede venir dado de la solución de modelos de menor escala, que pueden ser resueltos de manera acoplada en modelos *multiescala*. No obstante, este tipo de aproximaciones está más bien a nivel de desarrollo (Morenon et al., 2017; Bažant et al., 2017; y Rahimi-Aghdam, 2017) y no están bien establecidos en la industria.

La escala de mayor interés para las evaluaciones de seguridad de la presa es macroscópica (macroescala). Tratando de simplificar el acoplamiento entre los distintos campos, el efecto

de la reacción expansiva puede considerarse esencialmente a través de la deformación *impuesta*. Esta deformación representa el cambio en la configuración libre de tensiones para cada punto material. Las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones y las condiciones de contorno de la presa modifican consistentemente la distribución de tensiones. Además, la extensión de la reacción puede afectar a las propiedades mecánicas del hormigón, especialmente disminuyendo la resistencia a tracción.

Este es el tipo de aproximación habitual en los modelos a la escala de la presa (macroscópica), y es el planteamiento que se sigue a continuación. Por tanto, el acoplamiento entre el modelo mecánico del hormigón y la reacción química se establece esencialmente a través de un modelo de expansión. Asumiendo pequeñas deformaciones elásticas, la deformación total se descompone aditivamente en deformación mecánica (incluyendo las partes elásticas, plástica y de fisuración, que a su vez todas ellas pueden tener una componente reológica), de dilatación térmica y de expansión química. Se trata de *tensores* expresados a través de sus tres componentes espaciales directas y tres componentes independientes de cortante.

6.2.2. Modelos de reacción expansiva

Muchos aspectos de modelización son comunes a las reacciones expansivas independientemente de su cinética química. Los modelos que se comentan a continuación están inicialmente formulados para RAS, aunque en buena parte son extensibles a los ataques sulfáticos variando la cinética (Oliveira et. al, 2013); la diferencia principal es la necesidad de oxígeno, lo que hace que la expansión tienda a ser mayor cerca de los paramentos, y principalmente en el de aguas abajo, debido a la mayor facilidad para la difusión del oxígeno hacia el interior del hormigón.

Los modelos más básicos de expansión establecen una equivalencia entre la expansión química y las dilataciones. Se trata de modelos de expansión isótropa con las dilataciones predefinidas (no dependientes de otras variables de estado) en función del tiempo a través de una función habitualmente de tipo logístico, que es especialmente adecuada para reacciones en varias etapas. Para RAS, la expansión lineal (la volumétrica es el triple) puede estar en el orden de magnitud del 0,5 %.

Una de estas formas de expansión más extendida es la propuesta por Larive (1998). En el caso de condiciones ambientales constantes, la ley es de la forma:

$$\xi(t) = \frac{1 - \exp(-t/\tau_c)}{1 + \exp(-t/\tau_c + \tau_L/\tau_c)} \quad \text{Ec. 16}$$

Siendo $\xi(t)$ la *extensión* de la reacción dependiente del tiempo t , inicialmente nula y de valor unidad cuando finaliza, lo que solo ocurrirá asintóticamente a tiempo “infinito”. Esta ley se representa en la Figura 6.2.

De acuerdo con Ulm (2000), las constantes temporales τ_c y τ_L dependen de la temperatura según la ley de Arrhenius a través de las energías de activación (obtenidas experimentalmente por Larive (1998), para RAS), y además de la presencia de agua. Físicamente, el *tiempo*

característico τ_c se considera esencialmente asociado a la hidratación expansiva, y se supone menos dependiente de la movilidad de los reactivos que el tiempo de latencia τ_L .

Dado que la temperatura y el estado tensional en general varían en el tiempo (la humedad viene controlada por la difusión de masa y es habitualmente menos variable), es conveniente expresar la ecuación anterior de manera incremental, de forma que la velocidad de la reacción dependa de la extensión de la propia reacción y de las condiciones ambientales y tensionales instantáneas (Figura 6.2).

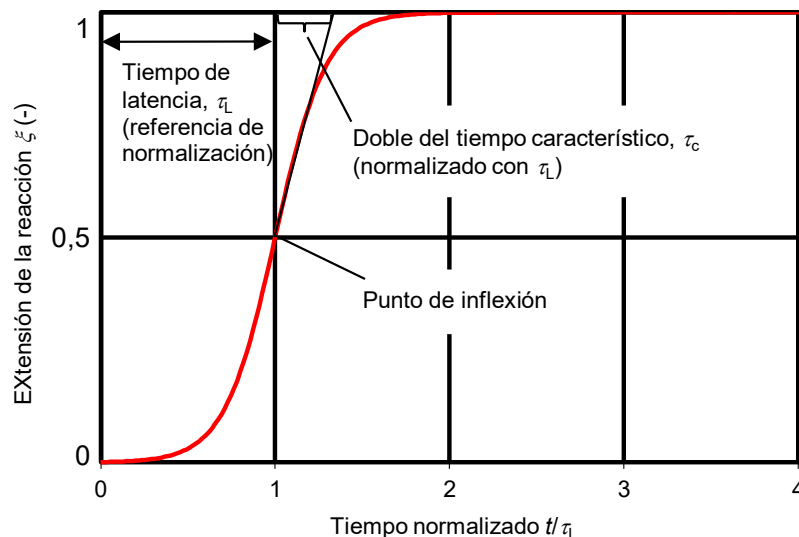


Figura 6.2. Evolución de la reacción

Este planteamiento tiene dos carencias fundamentales, consistentes en no capturar los siguientes fenómenos avalados experimentalmente por Multon (2003):

- La evolución de la propia reacción y de sus efectos depende del estado tensional y de fisuración. Esto es debido a que el grado de compresión afecta a la movilidad de los reactivos, y a que la fisuración y la microfisuración (tanto por tracciones como por compresiones elevadas) crea espacios en los que puede expandirse libremente el gel sin inducir hinchamientos macroscópicos.
- La anisotropía creada por el estado tensional induce a su vez una anisotropía en la expansión. Aquellas direcciones más comprimidas tenderán a expandir menos que las menos comprimidas o traccionadas.

Uno de los primeros modelos que surgió para tratar de simular la anisotropía inducida es el de Charlwood et al. (1992), que simplificadaamente solo tenía en cuenta la tensión que actúa en cada dirección principal para determinar la expansión a lo largo de la misma. Es especialmente destacable el modelo de Saouma y Perotti (2006), descrito en detalle en la monografía de Saouma (2014), que partiendo del de Ulm (2000) introduce las siguientes modificaciones fundamentales:

- La evolución de la deformación volumétrica efectiva se supone también proporcional a la extensión de la reacción, pero además afectada por dos factores, uno dependiente de la fisuración y otro del nivel de compresión.
- El incremento de la deformación volumétrica se descompone según las direcciones de las tensiones principales instantáneas. El criterio de descomposición se basa en definir un

conjunto de estados entre los que se interpola el reparto. Por ejemplo, si el estado tensional es uniaxial y la dirección cargada es de tracción, entonces la deformación volumétrica se distribuye por igual en las tres direcciones del espacio. Por otra parte, si la carga uniaxial es de compresión y superior a un cierto valor umbral (experimentalmente de unos 8 MPa), entonces la expansión se distribuye exclusivamente en las direcciones transversales; esto es, no hay deformación impuesta en la dirección cargada.

6.2.3. Modelos mecánicos de hormigón

Como se ha comentado, es práctico desacoplar el efecto mecánico de la expansión de la reacción del resto de los comportamientos mecánicos. La ventaja principal de este planteamiento es que permite usar modelos *constitutivos* arbitrarios del hormigón, pudiendo ser suficiente una aproximación elástica lineal o pudiendo incluir efectos inelásticos como es la fisuración por tracciones y la plastificación por compresiones.

Uno de los aspectos mecánicos más peculiares del hormigón es la fisuración, antes de cuya formación se identifica una zona de proceso de fractura. Según el exitoso modelo de Hillerborg et al. (1976) el parámetro de más significado físico que controla este proceso es la energía de fractura, que es la necesaria para propagar una fisura según una unidad de superficie.

Existen distintos planteamientos para modelizar la fisuración, como fisuras discretas (véase el apartado 6.3.2) o incorporando sus efectos en el comportamiento del material continuo. Dentro de este último planteamiento, se distinguen a su vez dos tipos de aproximaciones, modelos de fisuración distribuida y modelos que representan la fisuración en el marco de la plasticidad (Lee y Fenves, 1998); en ambos casos el comportamiento está vincula a un tamaño característico del elemento en el que se desarrolla la fisura.

Por otra parte, el modelo puede ser enriquecido para capturar las deformaciones plásticas por compresión (aplastamiento). Estos modelos son capaces de simular el aumento de la resistencia del hormigón debido al confinamiento. Por ejemplo, mientras que la resistencia en un ensayo biaxial de tensión plana es aproximadamente un 16 % mayor que el de compresión simple, en un ensayo triaxial la presión de rotura puede superar sobradamente más de un orden de magnitud dicha compresión uniaxial. Este mecanismo permite resistir compresiones localizadas dentro del volumen de hormigón, producido por el aumento de volumen que acompaña las deformaciones plásticas, fenómeno conocido como *dilatancia*.

6.3. Análisis estructural

El presente apartado consta a su vez de cuatro subapartados. El primero de ellos describe el método numérico que está resultando más satisfactorio para resolver la idealización matemática del problema estructural, que es el método de los elementos finitos. El segundo subapartado describe específicamente la importancia y aspectos de modelización de las interacciones (contactos) entre juntas y con el terreno. El tercer subapartado describe el

acoplamiento entre las distintas *físicas* (problemas térmico, químico y mecánico) que están involucradas. Y finalmente el último subapartado tiene por objeto consideraciones sobre la calibración y validación de los modelos.

6.3.1. Método de los elementos finitos

Se trata de un método numérico para resolver multitud de problemas físicos que se plantean en la ingeniería. Lo que resuelve es un problema *variacional*, en el que se busca una distribución de las variables primarias (los desplazamientos en un problema tenso-deformacional o las temperaturas en un problema de transferencia del calor) que minimiza una función que representa la energía potencial total del sistema. Esta formulación del problema se denomina débil o integral, mientras que el planteamiento del problema a través de ecuaciones diferenciales constituye la formulación fuerte.

Las funciones admisibles (o de prueba) entre las que se busca la solución están formadas por la combinación lineal de unas funciones llamadas *de forma* que se soportan en los *elementos finitos* en los que se particiona (*discretiza* o *malla*) la geometría. Los elementos quedan definidos por la posición de unos puntos denominados *nodos* o *nudos*, que se comparten entre elementos. La capacidad de mallar geometrías arbitrarias está en la base del éxito del método.

Al final, el método plantea un sistema de ecuaciones lineales para los desplazamientos nodales (en el caso de un problema tenso-deformacional). Incluso cuando el problema es no lineal, se resuelve numéricamente con una secuencia de sistemas de ecuaciones lineales cuyas soluciones se van aproximando a la del problema de interés (método de Newton-Raphson). La matriz del sistema se denomina de rigidez, y proviene de integrales en el dominio y del ensamblaje de las rigideces elementales. Estas integrales se realizan de manera numérica a través de las variables en unos puntos generalmente en el interior de los elementos denominados puntos materiales o de Gauss (habitualmente se sigue el método de Gauss). En ocasiones, si el problema presenta elevadas no linealidades que dificultan excesivamente la convergencia, son convenientes métodos explícitos en los que ni siquiera se ensambla la matriz de rigidez; pero estos procedimientos son poco frecuentes en el contexto que nos ocupa.

Existen muchos códigos libres y comerciales con implementaciones del método. En general, las tareas que involucran la modelización por el método de los elementos finitos son las siguientes:

- a) Reconstrucción de la geometría para generar una malla de elementos finitos
- b) Asignación de propiedades
- c) Definición de condiciones de contorno
- d) Definición de acciones
- e) Análisis
- f) Postproceso de los resultados

Es conveniente realizar análisis de sensibilidad de los resultados, tanto para aumentar la confianza en los resultados como sobre todo para entender cómo se comporta el modelo y cuáles son los parámetros que controlan el problema.

6.3.2. Interacciones en juntas y con el terreno

Uno de los modos de fallo más preocupantes en presas es debido a la inestabilidad por deslizamiento o vuelco. La redistribución de tensiones en la presa debida a la expansión química puede afectar a la seguridad en este sentido. Un modelo capaz de capturar estas formas de fallo debe incluir adecuadamente la interacción con el terreno.

La modelización no es adecuada por el hecho de representar la roca si en el interfaz comparte nodos con la presa, sino que deben permitirse desplazamientos relativos y separaciones. De hecho, incluso puede ser innecesario representar un volumen de terreno alrededor de la presa siendo en ocasiones suficiente para las comprobaciones de estabilidad representarlo como una superficie rígida que contacta (puede ser cohesivamente) con la presa. En general es recomendable una superficie de forma suave, y en otro caso se precisaría enriquecer el modelo para capturar los fallos localizados alrededor de la cimentación.

Por otra parte, generalmente, en las presas son esperables movimientos diferenciales entre bloques separados por juntas transversales. Aun cuando se inyecten las juntas buscando el monolitismo, como ocurre en las presas arco, los movimientos verticales y radiales diferenciales entre bloques inducidos por la expansión pueden acomodarse en las juntas a través de deslizamientos entre bloques. Estos desplazamientos tangenciales relativos entre superficies, debido a su rugosidad, tienden a separar los bloques manteniendo el contacto (*dilatancia*), pudiendo aumentar las compresiones en la junta.

Para las interacciones anteriores, se pueden plantear modelos de interfaz que describen el comportamiento de la junta, incluyendo la degradación de la zona de proceso de grieta desde un comportamiento cohesivo hasta un contacto friccional. No obstante, el comportamiento asintótico idealizado a través de un contacto friccional de Coulomb no cohesivo (no se admiten presiones negativas sino separaciones) es una buena aproximación en muchas ocasiones y generalmente conservador: $\tau \leq \mu p$; siendo τ la tensión tangencial, p la presión de contacto y μ el coeficiente de rozamiento. Cuando se establece la igualdad, se libera la restricción de desplazamiento tangencial nulo y la tensión cortante actúa en la dirección de la velocidad relativa (contenida en la superficie de contacto ya que las penetraciones están impedidas y las separaciones van acompañadas de presión nula). Un coeficiente de rozamiento característico entre hormigones o con roca es 0,8, aunque dada su incertidumbre es conveniente reducirlo a aproximadamente 0,5.

Por otra parte, las fisuras preexistentes en la presa pueden representarse de la misma manera, quedando mejor modelizadas que induciéndolas en los puntos materiales de los elementos finitos que las contienen (según el apartado 6.2.3). Otra aproximación más sofisticada es inducir las fisuras dentro de los elementos con una técnica conocida como XFEM (Extended Finite Element Method) introducida por Belytschko y Black (1999), con la ventaja de que su

propagación puede modelizarse siguiendo un camino arbitrario dependiente del estado mecánico que va resultando de la simulación.

Un aspecto que debe tenerse en cuenta es la presión del agua intersticial, tanto entre bloques como en la superficie en contacto con el terreno (subpresión). En el caso de fisuras abiertas la presión penetra prácticamente sin pérdida de carga hasta el frente de fisura.

6.3.3. Análisis termoquímico-mecánico

Como se ha comentado, el campo térmico afecta a la reacción química que a su vez afecta al problema tenso-deformacional. Aunque todos estos campos están acoplados entre sí, es práctico acoplarlos solo débilmente dentro de lo posible.

Un planteamiento que ha resultado satisfactorio en muchos casos es resolver en primer lugar el problema puramente térmico para obtener una distribución de temperaturas periódica representativa de un año medio de funcionamiento de la presa. Después, la historia de la distribución de temperaturas se importa en el problema mecánico. Las mallas ni siquiera son necesariamente las mismas, sino que pueden interpolarse las temperaturas obtenidas en los nodos del problema térmico a los puntos de integración del problema mecánico.

El problema mecánico y el químico se resuelven en el mismo análisis. El modelo de reacción alimenta el problema mecánico con deformaciones impuestas (que pueden ser anisótropas); a su vez, la expansión se calcula en función de la temperatura, la propia extensión de la reacción y el estado tensional. En este planteamiento la influencia de la presencia de agua se supone conocida (habitualmente constante en el tiempo, aunque no necesariamente uniforme en la presa).

Por otra parte, en el modelo mecánico es conveniente asumir una variación periódica del nivel del embalse hasta el estado actual, de manera análoga a la historia de temperaturas anteriormente comentada. Una vez reproducido el estado actual de la presa, analizada desde su construcción, el modelo puede predecir el comportamiento futuro incluidos los efectos de cambios en la forma de operar o de posibles actuaciones (por ejemplo, cortes para liberar tensiones).

6.3.4. Calibración y validación

La calibración de parámetros viene de ensayos de laboratorio y de la auscultación. La información de nivelación es especialmente interesante ya que: *i)* no son puntuales como las deformaciones; *ii)* son relativamente poco sensibles al nivel del embalse; *iii)* son sensibles a la temperatura, pero no tanto como los movimientos horizontales a sus gradientes; y *iv)* proporcionan valores representativos de la expansión por bloque.

Es conveniente no complicar el modelo más de lo necesario tratando de reducir el número de parámetros al mínimo. Por ejemplo, una manera de mejorar el ajuste de las medidas de nivelación de cada bloque es asignar parámetros distintos al modelo de expansión, pero esto debe evitarse si no hay evidencias históricas o de laboratorio de que el hormigón sea distinto. La diferencia en la expansión puede deberse a un estado tensional distinto, temperatura, presencia de agua, etc. Cuanto mejor se modelicen las causas, más representativo será el modelo. Esto es especialmente relevante para predecir el comportamiento de la presa cuando se realizan actuaciones.

Los modelos estadísticos de los datos de auscultación, especialmente los de regresión, permiten estimar de manera realista los parámetros de las leyes constitutivas. A pesar de que todos ellos intervienen conjuntamente en la respuesta de la presa, es conveniente proceder de manera secuencial comenzando con el módulo de elasticidad: en ausencia de otras sollicitaciones y en un modelo lineal con cimentación suficientemente rígida, el movimiento de cada punto depende del nivel del embalse y linealmente del módulo de elasticidad; puesto que los modelos de regresión desagregan la relación cota-movimiento, el ajuste resulta inmediato. La estimación de los parámetros térmicos es algo más compleja, ya que influyen tanto la amplitud del movimiento como su desfase respecto a la onda térmica: la amplitud está directamente controlada por el coeficiente de dilatación lineal; el desfase depende de la conductividad, el calor específico y la densidad (vid. 6.1.1.2). Finalmente, determinados los parámetros anteriores e introducidos en el modelo estructural, la parte irreversible de los modelos de regresión permitirá ajustar los parámetros de la reacción expansiva.

Debe tenerse en cuenta que conjuntos distintos de los parámetros pueden producir movimientos similares con estados tensionales muy distintos. Por esta razón, es muy recomendable hacer estudios de sensibilidad.

Los modelos deben revisarse cada pocos años conforme se disponga de información adicional de las medidas de auscultación. Además, las zonas de fisuración que vayan apareciendo deben ser acordes con el modelo.

6.4. Experiencias en España

Existen experiencias en España de modelización de fenómenos de expansión química en presas desde hace más de treinta años. La comunicación de De Blas (1989) sobre la presa de San Esteban (Orense) ya concluye que la simulación numérica es adecuada para analizar estructuras bajo cargas no consideradas en el diseño, y permite confirmar la hipótesis de que fenómenos expansivos del hormigón son la causa de anomalías observadas. Además, el trabajo identificó zonas críticas de la presa donde efectivamente aparecieron fisuras con posterioridad.

Según se ha comentado en el apartado 6.2.1, pueden plantearse modelos complementarios a distintas escalas, tanto a nivel micro y meso-estructural (López, 1999) como macroestructural. Debido a su diferente nivel de resolución y complejidad, es importante seleccionar una estrategia o tipo de modelos que se ajuste al problema a resolver (Pardo, 2014).

A continuación, se describen otras publicaciones recientes, sin ánimo de producir un listado extensivo, sino solo comentando algunas de las más representativas. Puede afirmarse que en España se han aplicado técnicas avanzadas de modelización al nivel del estado actual de conocimiento mundial.

6.4.1. Modelos de presas afectadas por reacción árido-álcali

Herrador et al. (2009) apuntan que los modelos de expansión basados en las deformaciones impuestas tienden a sobrevalorar las tensiones que se desarrollan. Para evitarlo proponen un modelo fenomenológico de expansión isotrópica que se inhibe a una presión predefinida. Además, para representar la respuesta frente a deformaciones mecánicas, el modelo constitutivo considera ocho redes reológicas en paralelo de Maxwell con funciones de fluencia dependientes de la edad. Se calibraron los parámetros de material a partir de testigos extraídos de la presa de Belesar (Lugo).

Rodríguez et al. (2011) aplican los modelos de expansión de Ulm et al. (2000) y de Saouma y Perotti (2006) a dos presas en España, una arco-gravedad y otra de arco de doble curvatura. En primer lugar, se resolvió la ecuación del calor para obtener la historia de la distribución de temperatura de cada presa, teniendo en cuenta la información térmica disponible y la historia del nivel del embalse. Posteriormente se llevó a cabo un análisis químico y mecánico acoplado para reproducir la historia de movimientos y estimar el estado tensional actual y la evolución futura.

Martín et al. (2018) proponen una nueva metodología de caracterización del hormigón que estima la fracción de reacción consumida en el momento del estudio. La metodología ha permitido zonificar los hormigones de la presa de San Esteban con características expansivas distintas, aumentando la fiabilidad de los modelos. Más específicamente:

- a) La estimación de la fracción de reacción consumida se basa en ensayos de expansión de probetas de mortero acelerados a 80 °C. Se fabricaron dos tipos de probetas de granulometría normalizada: unas directamente con la fracción de árido fino (de tamaños de grano inferiores a 5 mm) y otras con los áridos gruesos molidos. La hipótesis básica es que la expansividad o reactividad residual es proporcional a la fracción de superficie específica no reaccionada, la cual, a su vez, es inversamente proporcional al tamaño de los áridos (siendo la constante de proporcionalidad función de la densidad de empaquetamiento de los mismos y de su factor de forma). Relacionando la expansividad de los áridos finos (d) y gruesos (D) se llega a que la fracción de expansión del hormigón que ya ha tenido lugar es:

$$\xi = \frac{\lambda - 1}{\lambda - d^*} \quad \text{Ec. 17}$$

siendo λ la relación a tiempo infinito entre la expansión obtenida con la fracción gruesa molida de los áridos y la obtenida con la fracción fina. El factor de molienda adimensional d^* es la relación entre el tamaño equivalente de los áridos de la probeta normalizada y de la fracción gruesa. El tamaño equivalente se obtiene con la media

armónica de la granulometría, que refleja la superficie específica del conjunto. Se concluyó que, para los hormigones más expansivos de la presa, la fracción instantánea de reacción consumida era alrededor del 40 %.

- b) La zonificación se estableció a partir de los registros de cambios en el hormigón (cemento, áridos y dosificación) y calibrando dos fechas intermedias durante la construcción de la presa que diesen lugar a tres materiales distintos coherentes con las lecturas de nivelación en los 18 bloques. La hipótesis también se contrastó satisfactoriamente con los ensayos de expansión de áridos y con las medidas de extensometría. La calibración del modelo con el comportamiento conjunto de la presa resultó en una expansión a tiempo infinito del material más expansivo de 0,34 % para un tiempo de latencia a 14 °C de 67 años y un tiempo característico de 17 años. La heterogeneidad del hormigón junto con la distribución de temperaturas condicionada por la mayor insolación en la margen derecha, explican la fuerte asimetría en los movimientos de la presa (Figura 6.3).

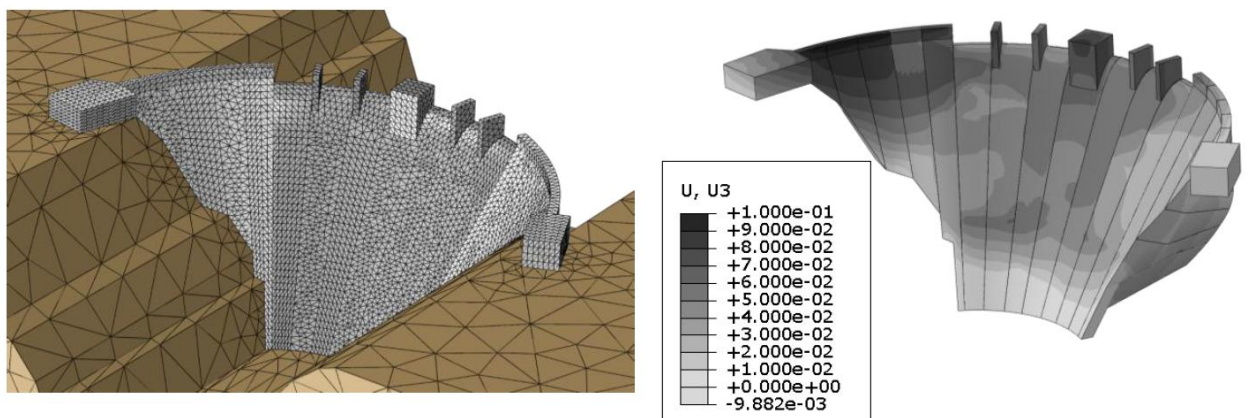


Figura 6.3. Modelo y desplazamientos verticales (m) en 2017 en la presa de San Esteban (Martín et al., 2018)

6.4.2. Modelos de presas afectadas por ataque sulfático

Oliveira et al. (2013) desarrollan un modelo simplificado de la cinética química del ataque sulfático interno fundamentado en características físicas y químicas del hormigón y de los áridos. A nivel estructural se plantea la ley de Fick para determinar la distribución de la concentración de oxígeno, teniendo en cuenta la cantidad consumida por la reacción. Las historias de la concentración del oxígeno y del tiempo determinan la fracción de la reacción. Las variaciones de volumen se reparten isotrópamente en las direcciones del espacio. El modelo ha sido validado en la presa de Graus (Lérida).

Con una mayor dificultad computacional, Campos et al. (2016) plantean un modelo combinado de oxidación y ataque sulfático, donde las concentraciones de las sustancias son variables de estado. El modelo tiene en cuenta la reducción de la expansión efectiva del hormigón al llenarse los poros con los productos de la reacción. Además, los coeficientes de la cinética de la reacción y de difusión de oxígeno dependen del contenido de agua. Pero se supone que no hay variaciones significativas de la temperatura en la estructura, quedando su efecto predefinido. El modelo se ha aplicado a la presa de Graus (Lérida).

6.4.3. Modelo de presa afectada por varias reacciones

Existen estudios publicados (Campos, 2018) de una presa de gravedad afectada tanto por ataque sulfático interno como por reacción álcali-árido. Para describir la expansión debida al ataque sulfático consideraron el modelo de Campos et al. (2016), anteriormente comentado y, desacopladamente, para la reacción álcali-árido utilizaron el modelo de Ulm (2000). Se construyeron un modelo de elementos finitos plano y otro tridimensional. Según los análisis realizados, el ataque sulfático domina los movimientos horizontales actuales, mientras que la reacción árido-álcali hace los propios con los verticales. Además, se valoró el grado de fisuración en las juntas a través de la energía liberada durante el proceso de fractura.

6.5. Bibliografía

- Bazant, Z. P. y Rahimi-Aghdam S. (2017): “Diffusion-Controlled and Creep-Mitigated ASR Damage via Microplane Model. I: Mass Concrete”, *J. Eng. Mech.*, 143 (2)
- Belytschko T. y Black T. (1999): “Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45, pp. 601–620
- Box, G.E.P. y Jenkins, G.M. (1976), *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Revised Edition, Oakland, Ca: Holden-Day
- Campos, A., López, C. M. y Aguado, A. (2016): “Diffusion-Reaction Model for the Internal Sulfate Attack in Concrete”, *Construction and Building Materials*, 102, pp. 531-540
- Campos, A., López, C. M., Blanco, A. y Aguado, A. (2018): “Effects of an Internal Sulfate Attack and an Alkali-Aggregate Reaction in a Concrete Dam”, *Construction and Building Materials*, 166, pp. 668-683
- Cancelo, J. R., Espasa A. and Grafe, R. (2008): “Forecasting the Electricity Load from One Day to One Week Ahead for the Spanish System Operator”, *International Journal of Forecasting*, 24 (4), pp. 588-602
- Charlwood, R.G., Solyman S.V. y Curtis D. (1992): “A Review of Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams”, *Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, Fredericton, Canadá, pp. 1-29
- De Blas, J. (1989): “Analysis of anomalies in the behaviour of an arch dam under concrete expansion” en *ICOLD, International Symposium on Analytical Evaluation of Related Safety Problems*, Vol I, paper R8. Copenhagen
- Draper, N.R. and Smith, H. (1966): *Applied Regression Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Espasa, A. y Cancelo, J.R. (eds.) (1993): *Métodos cuantitativos para el análisis de la coyuntura económica*, Madrid: Alianza Editorial, S.A.
- Herrador, M. F., Martínez-Abella, F. y del Hoyo, R. (2009): “Mechanical Behavior Model for ASR-Affected Dam Concrete under Service Load: Formulation and Verification”, *Materials and Structures*, 42, pp. 201-212
- Hillerborg, Modeer M. y Petersson P.E. (1976): “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, *Cement and Concrete Research*, 6, pp. 773-782
- Larive (1998): “Apports Combinés de l’Expérimentation et de la Modélisation à la Compréhension de l’Alcali-Reaction et de ses Effects Mécaniques”, *Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Paris
- Lee J. y Fenves G.L. (1998): “Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (8), pp. 892-900
- López, C. M. (1999): *Análisis microestructural del hormigón utilizando elementos finitos de interfase*. Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya
- Maddala, G.S. (1977): *Econometrics*, New York: McGraw-Hill

- Martín, A. B., Menéndez, E., Lacoma, L. (2018): “Nueva Metodología para la Predicción de la Expansión del Hormigón en Presas con RAA” en *Jornadas del Comité Nacional Español de Grandes Presas*
- Morenon P., Multon S., Sellier A., Grimal E., Hamon F. y Bourdarot E. (2017): “Impact of Stresses and Restraints on ASR Expansion”, *Construction and Building Materials* 140, pp. 58-74
- Multon S. (2003): *Evaluation Expérimentale et Théorique des Effets Mécaniques de l’Alcali Réaction sur des Structures Modèles*, Tesis Doctoral, Université de Marne la Vallée, Francia
- Oliveira, I, Cavalaro, S. H. P. y Aguado, A. (2013): “New Kinetic Model to Quantify the Internal Sulfate Attack in Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 43, pp. 95-104
- Pardo i Bosch, F. (2014): *Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya
- Prürer, E. and Steiner, N. (1986): *Applications of statistical methods in monitoring dam behaviour*, WaterPower & Dam Construction, December
- Rahimi-Aghdam S., Bažant Z. y Caner F. C. (2017): “Diffusion-Controlled and Creep-Mitigated ASR Damage via Microplane Model. II: Material Degradation, Drying and Verification”, *J. Eng. Mech.*, 143 (2)
- Rodríguez, J., González, P., Martínez, F. y Martí, J. (2011): “Concrete Swelling in Two Spanish Dams”, en *XI ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Valencia
- Saouma V. y Perotti L. (2006): “Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions”, *ACI Materials Journal*, pp. 194-202, mayo-junio
- Saouma V. E. (2014): *Numerical Modeling of AAR*, CRC Press
- Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A. and Katayama, T. (2015). “A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction.” *Cement and Concrete Research*, 68, pp. 184-195
- Stucky, A. y Derron, M-H (1957): *Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs*, Lausanne: École Polytechnique de l’Université de L., pub. n.º 38
- Ulm, F. J., Coussy, O., Keifei, L. y Larive, C. (2000): “Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, 126 (3), pp. 233-242, marzo
- Verhulst, P.-F. (1838): “Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement”, *Corresp. Math. Phys.* 10, pp. 113-121

7. Control y mitigación

Tal y como se ha reflejado en los capítulos anteriores, el fenómeno de expansión química en el hormigón de presas suele ser detectado mediante las inspecciones visuales y el análisis de datos de auscultación cuando ha alcanzado un nivel de desarrollo tal que se hacen visibles sus manifestaciones a nivel mesoscópico. Esto ocurre una vez transcurrido un periodo de tiempo, variable en función de las características de los factores que contribuyen a su desarrollo, que suelen ser varios años desde su construcción.

La expansión química puede ocasionar con el tiempo una pérdida de funcionalidad de los elementos afectados, pudiendo llegar incluso a ser necesario el abandono de la presa. Dada la gravedad de las consecuencias que pueden derivar de su desarrollo, esta patología constituye un asunto de sumo interés por parte de propietarios, mantenedores e investigadores. A pesar de ello, hoy en día no se conoce el modo de frenar por completo el fenómeno, residente en el seno de la presa. Sin embargo, se sigue avanzando en la puesta en práctica de actuaciones que sean capaces de ralentizar el desarrollo de la reacción química que lo provoca con el ánimo de reducir los efectos en la presa y en elementos secundarios. Estas actuaciones confieren confianza al propietario, quien debe poner de su mano todos los medios necesarios para un correcto diagnóstico del fenómeno en la fase de detección, y para su mitigación en caso de ser necesario.

A continuación, se presentan las medidas a tomar para mitigar los efectos de la expansión química en presas.

7.1. Ampliación de la instrumentación

Como se explica en el Capítulo 4 del presente documento “Detección”, la instrumentación de auscultación junto con las inspecciones visuales supone un punto de partida para detectar la expansión química. Una vez constatada la presencia de este fenómeno, es muy aconsejable la instalación de instrumentación específica en varios puntos de la presa que proporcione mayor detalle sobre la distribución de deformaciones y concentraciones de tensiones debidas a la expansión química, y aporte información acerca de la temperatura interna del hormigón, de gran importancia en la modelización de la presa afectada por esta patología. Esta información es esencial para caracterizarla (zonificación y grado de desarrollo), y también ayuda a plantear posibles soluciones que traten de contrarrestarla (tratamiento).

A continuación, se describen algunos tipos instrumentos para ello:

a) Extensómetros de varillas:

Un mecanismo eficaz para poder establecer diferentes grados de afección por la expansión del hormigón es la instalación de extensómetros de varillas en distintos bloques de la presa y con distintas configuraciones en cuanto a número de varillas, profundidad de anclaje, ángulo de inclinación... Mediante el anclaje de cada una de las varillas a diferentes

profundidades podremos obtener información acerca de si hay alguna zona concreta en la que se aprecie un mayor efecto de la expansión.

Las lecturas de este tipo de sensores se obtienen midiendo la separación que existe entre las cabezas de las varillas ancladas en profundidad y una base fija (Figura 7.1), empleando para medir esos desplazamientos un comparador de precisión (Figura 7.2).

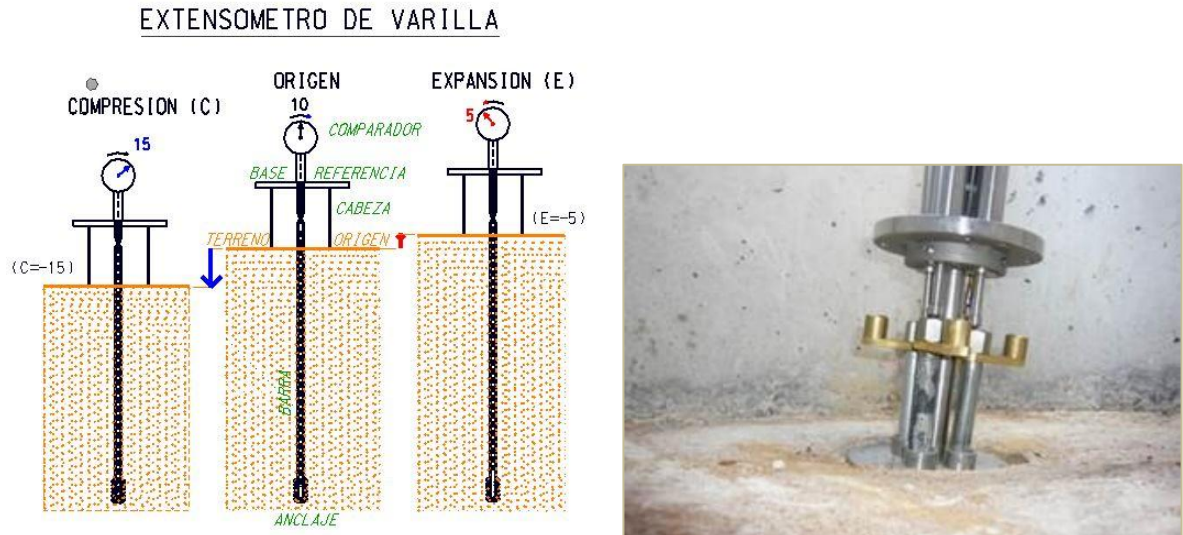


Figura 7.1. Esquema de lectura de un extensómetro de varillas. Cabeza del extensómetro y comparador empleado para su lectura (cortesía de Iberdrola, esquema basado en catálogo comercial, adaptado por J. de Blas)



Figura 7.2. Comparador de precisión (cortesía de Iberdrola)

b) Extensómetros de hilos:

Miden el desplazamiento vertical entre dos puntos de la estructura separados una larga distancia y unidos mediante un hilo de acero inoxidable, tal y como puede observarse en la Figura 7.3.

Su uso estaría fundamentalmente dirigido a presas de contrafuertes, ya que en ellas se puede colocar el hilo a lo largo de alguno de los paramentos interiores de los patios que conforman la presa.



Figura 7.3. Extensómetro de hilos instalado en una presa de contrafuertes (cortesía de Iberdrola)

c) Extensómetros:

En caso de que durante la fase de construcción se haya dispuesto en el interior de los bloques de presa dispositivos embebidos para la obtención de deformaciones internas del hormigón (Figuras 7.4a, 7.4b y 7.4c), tales como rosetas de cinco extensómetros más un extensómetro corrector de temperatura, podrá apreciarse en la mayoría de los casos que el dispositivo colocado en posición vertical experimenta una ligera tendencia no recuperable al alargamiento progresivo. No obstante, ese ligero alargamiento progresivo, en caso de haberlo, no suele conllevar un incremento significativo de las tensiones.



Figura 7.4a y Figura 7.4b. Montaje de una roseta de extensómetros y extensómetro corrector (cortesía de Iberdrola)



Figura 7.4c. Hormigonado de una roseta de extensómetros y extensómetro corrector (cortesía de Iberdrola)

Los extensómetros susceptibles de ser instalados pueden ser de diversos tipos:

- Extensómetros de resistencia eléctrica: las lecturas que se obtienen se basan en la variación de resistencia que ofrece un hilo conductor al paso de una determinada corriente eléctrica en función de las deformaciones que este experimenta. El esquema de funcionamiento de este tipo de extensómetros es el que aparece en la Figura 7.5.

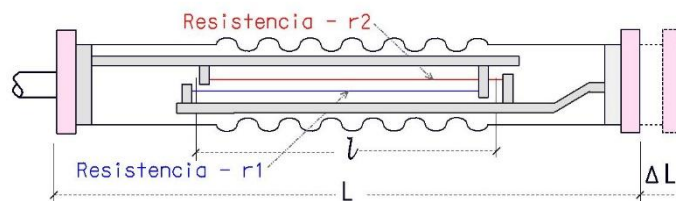


Figura 7.5. Esquema de funcionamiento (esquema basado en catálogo comercial, adaptado por J. de Blas)

A partir de las resistencias obtenidas se calculan las deformaciones, y a partir de estas, las tensiones.

A continuación se muestra un lector de lecturas de extensometría, así como el montaje de una roseta de extensómetros durante la construcción de una presa:



Figura 7.6a. Lector de extensómetros de resistencia (basado en catálogo comercial) <https://rstinstruments.com/> (Accessed 2022-01-19)



Figura 7.6b. Montaje de una roseta de extensómetros de resistencia (cortesía de Iberdrola)

- Extensómetros de cuerda vibrante: las lecturas que se obtienen se basan en la variación de frecuencia de vibración que emite un hilo de acero al ser excitado mediante un impulso eléctrico en función de las deformaciones que este experimenta. El esquema de funcionamiento de este tipo de extensómetros es el que aparece en la Figura 7.7.

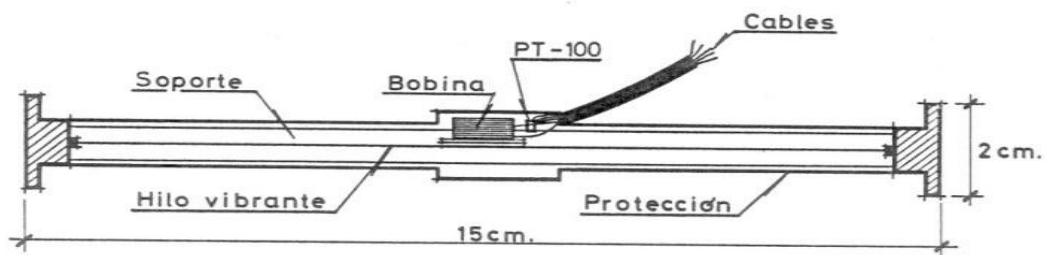


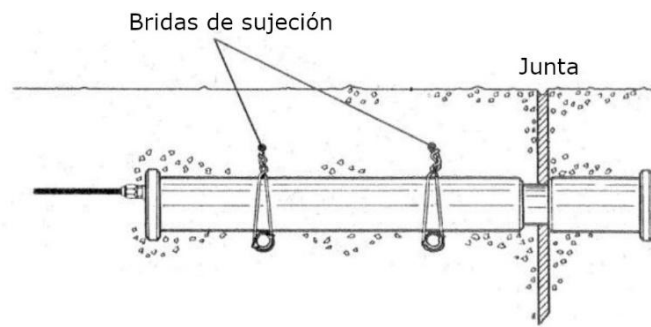
Figura 7.7. Esquema de funcionamiento (basado en catálogo comercial)

A partir de las frecuencias de vibración obtenidas se calculan las deformaciones, y a partir de estas, las tensiones.



Figura 7.8. Lector de extensómetro de cuerda vibrante; extensómetros de cuerda vibrante; montaje de roseta de extensómetros de cuerda vibrante (cortesía de Iberdrola)

- Extensómetros de gran base: en caso de querer obtener los ciclos de apertura y cierre en una junta entre bloques, una posible opción sería colocar este tipo de extensómetros de gran base en el contacto entre bloques, perpendicularmente a la junta, de manera individual en lugar de conformar rosetas, según puede apreciarse en la Figura 7.9. Algunos extensómetros de gran base llegan a alcanzar longitudes de varios metros.



Junta
Figura 7.9. Esquema de instalación de un extensómetro de gran base (basado en catálogo comercial, adaptado por J. de Blas)

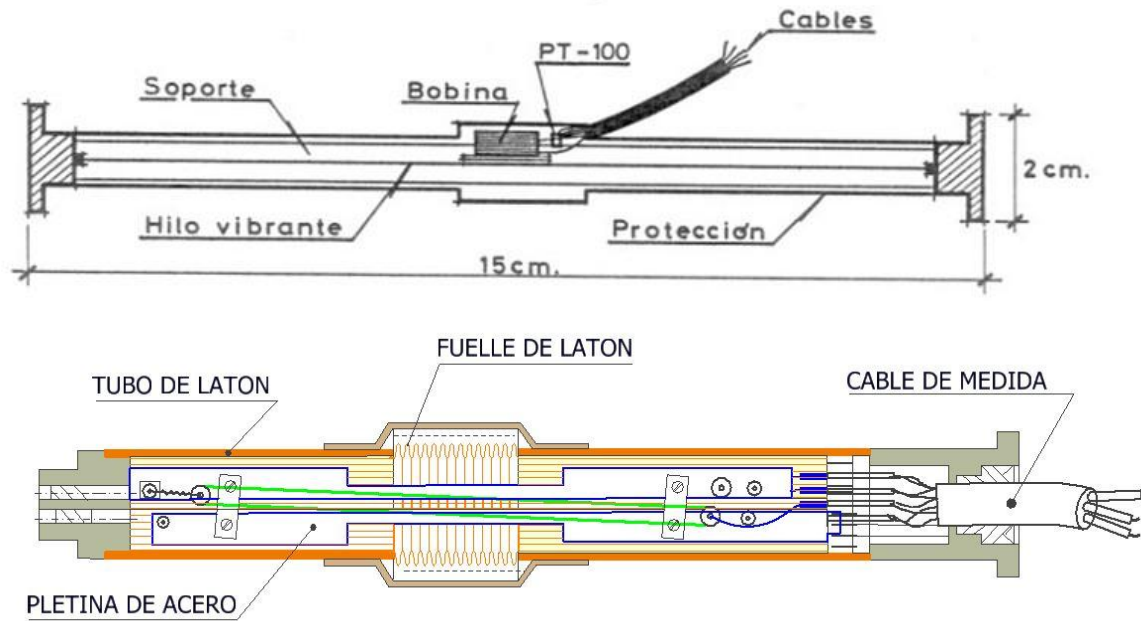
d) Dilatómetros:

Los dilatómetros (de resistencia eléctrica o de cuerda vibrante) son extensómetros destinados a la medida de movimientos de apertura y cierre en las juntas entre bloques (Figuras 7.10 a y 7.10 b). Son prácticamente idénticos a los extensómetros, pero están preparados para medir deformaciones en un rango de medida muy superior a estos (incluso centímetros), como corresponde a su ubicación en los contactos entre bloques.



Figuras 7.10 a. Instalación de un dilatómetro de resistencia eléctrica (cortesía de Iberdrola)

El principio físico de funcionamiento, métodos de medida, cálculos, etc. son los mismos que para los extensómetros de su mismo tipo.



Figuras 7.10.b. Dilatómetro de cuerda vibrante (imagen superior, basado en catálogo comercial); dilatómetro de resistencia (imagen inferior, basada en catálogo comercial y adaptada por J. de Blas)

e) *Tensímetros:*

Para la medida directa de tensiones en la presa se pueden instalar tensímetros (Figura 7.11), los cuales miden la fuerza que actúa sobre la superficie de un cilindro embebido en el hormigón.

La célula de carga basa su medida en transductores resistivos formados por un elemento elástico que varía su resistencia óhmica en función de la presión.

Es indispensable instalar bien el sensor y realizar una primera lectura válida que sirva de referencia para los cálculos posteriores de presión.



Figura 7.11. Tensímetro instalado en presa (cortesía de Iberdrola)

- *Tensímetro de resistencia eléctrica:* tal y como se puede apreciar en la Figura 7.12, el sensor consta de un disco formado por dos placas metálicas circulares separadas por una fina capa de mercurio sometida a una presión sensiblemente igual a la que transmite el

hormigón. El sensor (tipo Carlson) va alojado en un tubo. El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado apoyado sobre un potenciómetro de precisión, el cual está conectado a un circuito de puente de Wheatstone. El elemento elástico es el corazón del transductor y su deformación al comprimirse debe ser únicamente función de la presión e independiente de la temperatura y de otros factores ambientales externos

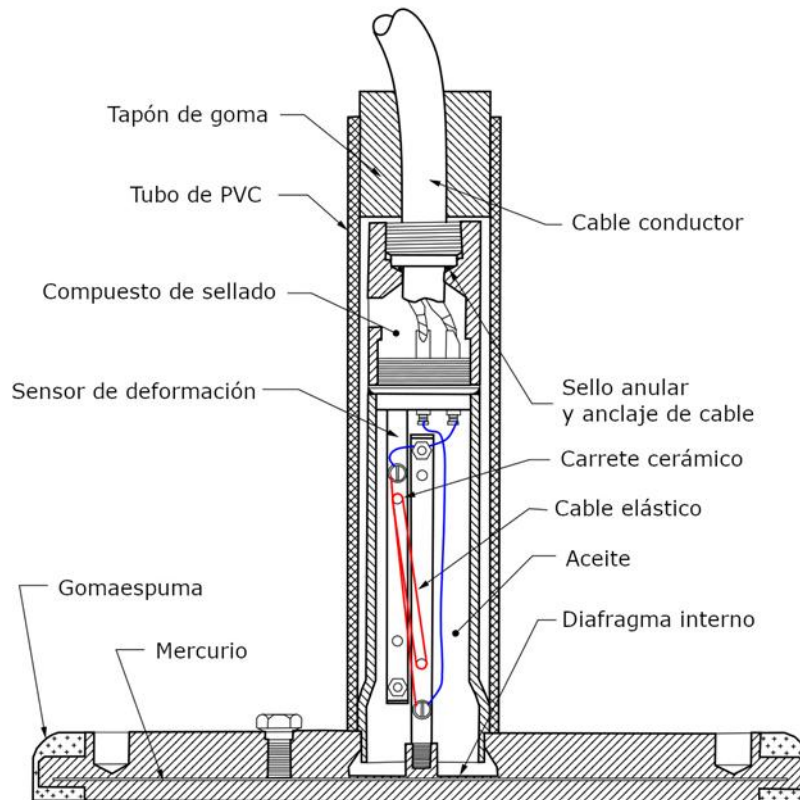


Figura 7.12. Esquema de un tensímetro (basado en catálogo comercial, adaptado por J. Rodríguez)

- *Tensímetro de cuerda vibrante:* su funcionamiento es similar al de resistencia eléctrica, salvo que en este caso se basa en la variación de frecuencia de un hilo metálico frente a la sollicitación externa.

En el proceso de lectura, un impulso enviado desde la unidad de medida al sensor excita su cuerda, provocando una vibración que es analizada y comparada con la frecuencia del receptor de la unidad de lectura. La variación de frecuencia se indica en un display de acuerdo con las constantes o parámetros de cada aparato.

f) *Termómetros:*

A la hora de efectuar un estudio exhaustivo de la reacción que está teniendo lugar en el hormigón de la estructura afectada, resulta de especial interés el hecho de poder disponer de las temperaturas internas de ese hormigón. Para ello pueden colocarse termómetros en el interior de la estructura, en aquellas zonas que se quieran estudiar con especial énfasis. En la Figura 7.13 se muestra un ejemplo de lector de temperaturas.



Figura 7.13. Lector de temperaturas (cortesía de Iberdrola)

Para el control de temperaturas se pueden emplear distintos tipos de termómetros:

- **Termorresistencia:** un termómetro de resistencia es un instrumento utilizado para medir las temperaturas aprovechando la dependencia que existe entre la resistencia eléctrica de metales (o aleaciones de metales) y la temperatura (Figura 7.14).

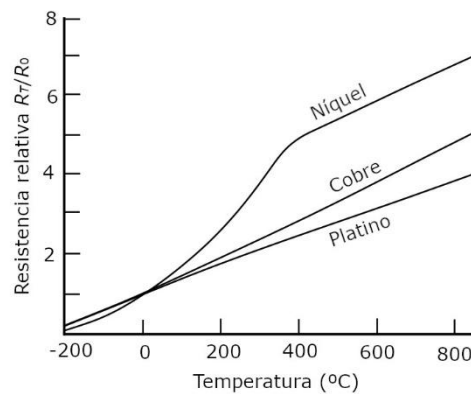


Figura 7.14. Variación de la resistencia con la temperatura en una termorresistencia (basado en catálogo comercial, adaptado por J. Rodríguez)

La más empleada habitualmente es la termorresistencia de platino (PT-100), cuya curva de variación con la temperatura se representa en la Figura 7.15.

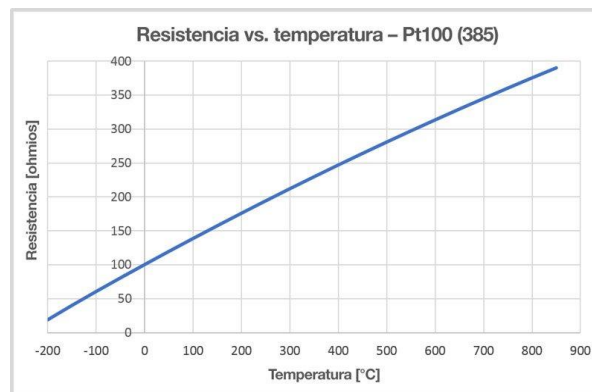


Figura 7.15. Variación de la resistencia con la temperatura en una sonda PT-100 (<https://blog.beamex.com> (Accessed 2022/01/19))

- Termistores: otro tipo de termómetros de resistencia son los termistores, formados por sustancias semiconductoras cuya conductividad eléctrica varía con la temperatura según una función de tipo exponencial. En ellos aumenta el número de portadores al aumentar la temperatura reduciéndose así la resistencia, tal y como puede observarse en la Figura 7.16. Los termistores tienen una sensibilidad del orden de diez veces mayor que las resistencias metálicas y, al contrario que en aquellas, en un determinado rango de temperaturas aumenta su resistencia al disminuir la temperatura.

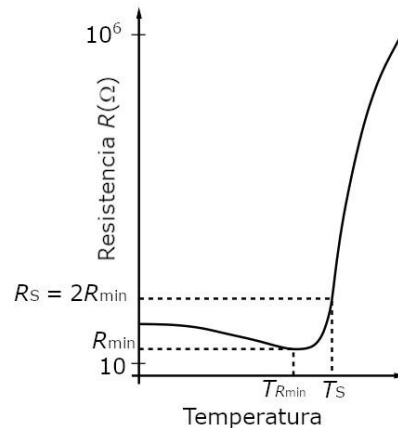


Figura 7.16. Variación de la resistencia con la temperatura en un termistor (basado en catálogo comercial, adaptado por J. Rodríguez)

- Termopares: más utilizados para obtener medidas en superficie. Las mediciones de temperatura que utilizan termopares se basan en que en un circuito continuo con dos cables de metales diferentes, se genera una fuerza electromotriz proporcional a la diferencia de temperatura de los puntos de conexión (Figura 7.17).

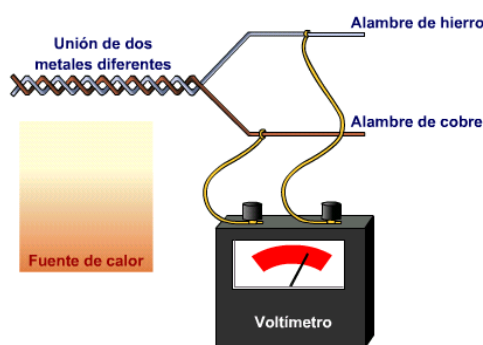


Figura 7.17. Esquema de funcionamiento de un termopar (<https://es.wikipedia.org/> (Accessed 2022/01/19))

g) Medidores de convergencia:

Se trata de una varilla (fibra de carbono, invar, u otro material con pequeño coeficiente de dilatación) que une dos puntos de la estructura, cuyos acortamientos o alargamientos se miden mediante un sensor (potenciómetro, cuerda vibrante, etc.) (Figura 7.18).

Proporciona de forma directa las deformaciones experimentadas entre los dos puntos que une la varilla.



Figura 7.18. Sensor de cuerda vibrante en medidor de convergencia (cortesía de Iberdrola)

h) Medidores de microdeformaciones:

Están provistos de sensores que tienen una sensibilidad a los posibles desplazamientos mucho mayor que la de la instrumentación descrita anteriormente (hasta 0,01 mm).

Hay medidores de microdeformaciones de varios tipos (de resistencia, de cuerda vibrante y de fibra óptica) y pueden instalarse directamente sobre el paramento de la estructura, sin necesidad de estar embebidos dentro del hormigón (Figura 7.19).



Figura 7.19. Medidor de microdeformaciones instalado en paramento de galería (cortesía de Iberdrola)

i) Inclínómetros:

En algunas ocasiones podría plantearse si los movimientos detectados en la estructura son debidos a una posible reacción química del hormigón o si bien parte de esos desplazamientos (o incluso la totalidad) pudieran ser la respuesta de la estructura a la acción de las laderas sobre las que se apoyan los estribos. El desplazamiento hacia el embalse de una ladera podría llegar a ocasionar una elevación de algún bloque de la presa, por lo que convendría discernir el origen de tales movimientos.

Para ello, pueden instalarse inclinómetros en determinadas zonas de la ladera susceptibles de estar experimentando algún deslizamiento. Estos inclinómetros constan de un taladro vertical que debería llegar a una profundidad tal que intercepte el posible plano de deslizamiento, por el cual se baja un sensor que transmite a una unidad de lectura la inclinación que va encontrándose a su paso por el taladro (Figura 7.20).



Figura 7.20. Sensor y unidad de lectura de inclinómetro Roc-Test Telemac (<https://roctest.com/> (Accessed 2022/01/19))

En las Figuras 7.21 y 7.22 se muestra su esquema de funcionamiento y una gráfica como ejemplo, elaborada a partir de resultados reales.

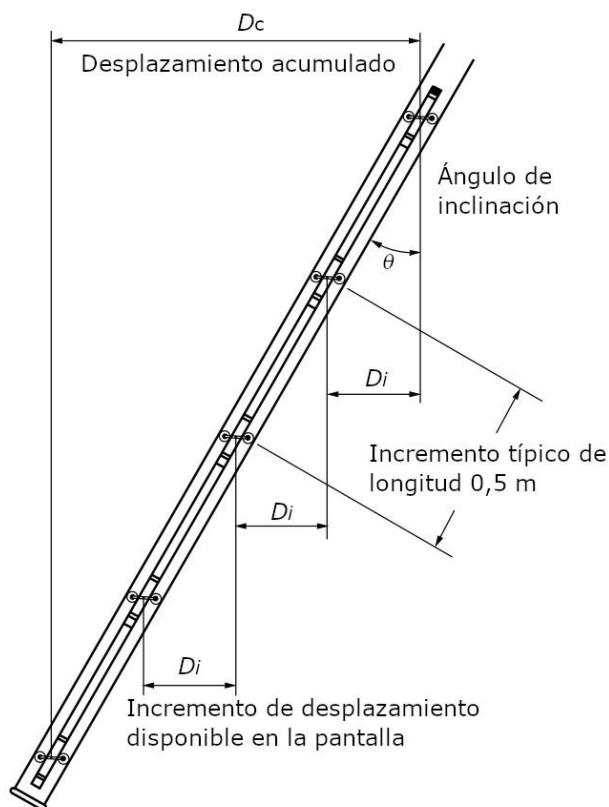


Figura 7.21. Esquema de funcionamiento de un sensor de inclinómetro (basado en catálogo comercial, adaptado por J. Rodríguez)

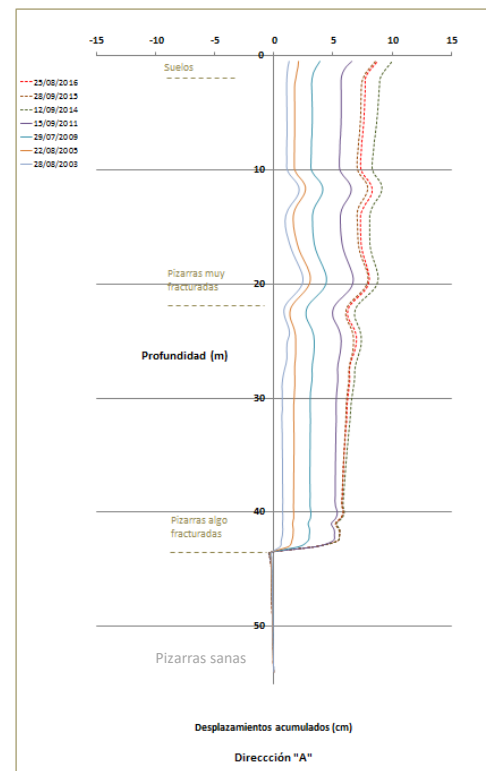


Figura 7.22. Gráfica resultante de las lecturas proporcionadas por un inclinómetro

7.1.1. Instrumentación para control y verificación de eficacia de actuaciones

La instrumentación es necesaria para conocer el comportamiento de una presa frente a los distintos tipos de acciones (directas o indirectas) que intervienen en la misma. En la primera mitad del siglo pasado, muchas no se instrumentaban, pero con el avance de los años se han ido incorporando sistemas que permiten ver la evolución del comportamiento. Estas innovaciones han ido siendo implementadas en otras presas a medida que se ha ido probando su eficacia. Es aconsejable aumentar la instrumentación intermedia y/o específica a medida que el análisis de resultados de la básica lo requiera.

La cantidad de datos no es la clave de la instrumentación y, consecuentemente, la misma se debe centrar en aquellos datos principales que aporten información relevante para el tema en estudio. ¿Cuáles son estos datos principales? La respuesta debería ser aquellos que, en la presa, nos den información en los tres ejes del espacio, así como aquellos externos que nos den información sobre las acciones (directas o indirectas) o la fiabilidad del propio sistema de medida.

La Tabla 7.1 presenta la configuración básica de la instrumentación, mientras que en el apartado 4.2 se describen algunos de los equipos de medida orientados a registrar expansiones potenciales en el hormigón.

Tabla 7.1. Configuración orientativa de instrumentación de una presa

Ubicación	Magnitud	Instrumentación		Información obtenida / Observaciones
En la presa	Movimientos	Control topográfico	Colimación angular, bisección, observación geodésica	Movimientos horizontales
			Nivelación	Movimientos verticales
		Péndulos diversos tipos		Desplazamientos horizontales radiales y tangenciales
		Elongámetros		Apertura de juntas Deslizamiento juntas
	Medidores tridimensionales		Movimientos en las tres direcciones	
	Temperaturas	Termopares		Habitualmente 4 por sección transversal según el eje del río
En el exterior	Nivel de embalse	Nivel neumático (con flotadores) o mediante sensores		Mediciones de nivel embalse estables y de alta precisión a largo plazo
	Estación meteorológica en presa o próxima	Sensor de temperatura Pluviómetro Anemómetro		Temperatura e influencia de radiación solar Pluviometría Velocidad del viento
	Laderas	Control topográfico Inclinómetros Extensómetros de varilla		Estabilidad de laderas

Las medidas complementarias exteriores o bien de temperatura en la propia presa están orientadas a desglosar el efecto tanto de acciones sobre las que se puede actuar (nivel de embalse) como de acciones impuestas (temperatura en la presa y embalse, pluviometría y velocidad del viento). En la Figura 7.23 se muestra una propuesta (Agulló, 1991) de medidas exteriores en la que, para una sección transversal según el eje del río, se plantea inicialmente instalar 4 termopares. Estas permiten definir la distribución no lineal de temperaturas y determinar el gradiente, así como poder explicar la aparición de tensiones internas autoequilibradas que pudiesen dar lugar a fisuras. Por otro lado, es habitual tomar medidas en 3 alturas (o a nivel de galerías y coronación) dado que estas proporcionan información suficiente.

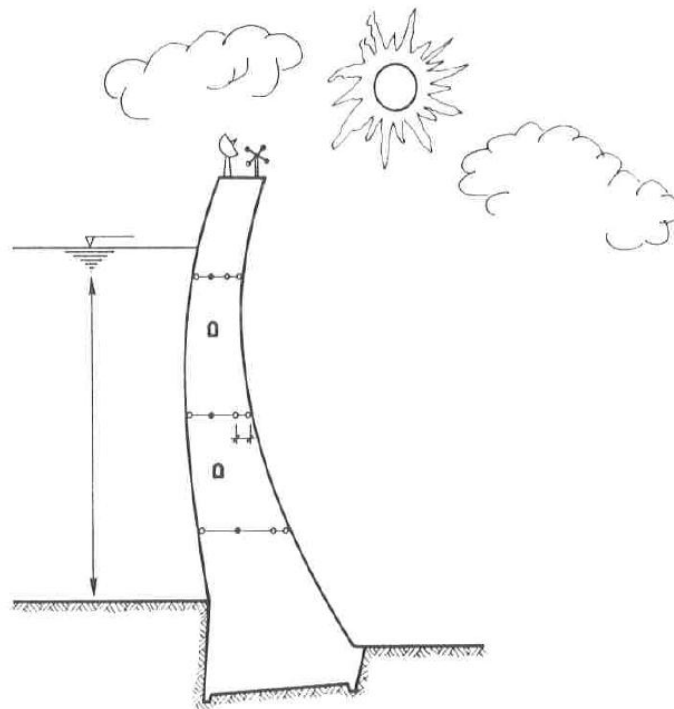


Figura 7.23. Instrumentación térmica (cortesía UPC).

Por último, hay que insistir en que si hay indicios de posibles movimientos de laderas (fallas, etc.) se dispongan bases en las mismas, para ver si se producen movimientos que no sean imputables a las expansiones, o en cualquier caso puedan desglosarse.

7.2. Actuaciones en presas

Una vez constatada la presencia de expansión química en el hormigón de la presa, la ejecución de actuaciones encaminadas a reducir los factores que favorecen la reacción o a paliar los efectos ocasionados en la estructura, debe estar condicionada por una evaluación entre el coste de dicha actuación frente a la vida útil de la estructura. Asimismo, es necesario efectuar un diagnóstico adecuado sobre el tipo de fenómeno, su nivel de incidencia y su localización para poder elegir la solución más adecuada. Los modelos matemáticos suelen ser de gran ayuda para planificar actuaciones de control y/o mitigación, ya que reflejan las áreas más afectadas,

muchas veces imposibles de controlar mediante inspecciones visuales, y la evolución del fenómeno con el tiempo en las diferentes zonas de la estructura.

El proceso resulta complejo y es conveniente que el equipo encomendado para su estudio sea multidisciplinar. Profesionales de diferentes especialidades aportarán al estudio varios puntos de vista necesarios para tomar una decisión eficiente.

Las posibles actuaciones para llevar a cabo pueden ir enfocadas a reducir los factores que favorecen el desarrollo de la reacción química (acciones preventivas) y/o a restablecer la funcionalidad inicial de la estructura. En ambos casos se deben tener en cuenta tanto la envergadura de una presa como su permanente contacto con el agua.

En los siguientes apartados se definen las actuaciones más comunes en presas.

7.2.1. Rehabilitación de la red de drenaje

El equipo encargado del mantenimiento de la presa debe asegurarse de que la red de drenaje esté limpia. A pesar de que el hormigón tiene agua en su interior porque la presa está en contacto permanente con el embalse, una red de drenaje limpia ayudará a evacuar mayor cantidad de agua, lo que reduce significativamente (no en su totalidad) la disponibilidad de uno de los agentes más importantes en el desarrollo de la reacción química expansiva.

A continuación, se adjuntan unas fotografías de la limpieza de drenes con agua a presión (Figuras 7.24a y 7.24b).



Figura 7.24a. Tobera con agua (cortesía de Iberdrola)

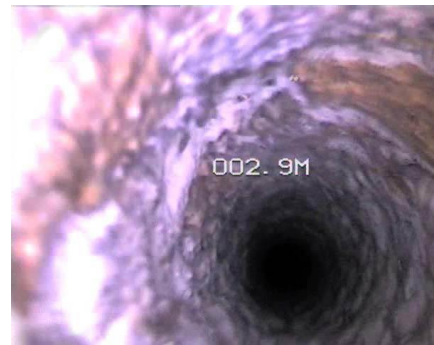


Figura 7.24b. Interior de un dren limpio (cortesía de Iberdrola)

En ocasiones no basta con limpiar con agua a presión los drenes, sino que es necesaria su reperforación, y es posible que llegara a ser necesario una ampliación de la red de drenaje para aumentar el caudal de agua evacuado.

7.2.2. Inyecciones

Tal y como se ha comentado en puntos anteriores, las fisuras ramificadas son un síntoma característico de la expansión química y constituyen vías de transporte de reactivos y puntos débiles de la estructura. Los tipos de productos que suelen inyectarse son los siguientes:

- i. *Cemento*: Son apropiados para la consolidación e impermeabilización de cimentaciones en roca, en determinados suelos, y para discontinuidades de abertura mayor a 0,3 mm, inactivas y no comprometedoras. Sus principales inconvenientes son la fragilidad, la retracción y una adherencia no garantizada. En este tipo de inyecciones debe prestarse especial cuidado al aporte de álcalis provenientes del nuevo material.
- ii. *Microcemento*: Se aplica fundamentalmente en fisuras, retomas y consolidación de hormigón con compactación defectuosa; generalmente no se emplea en cimientos. Si se mezcla con aditivos la penetración es mayor, al igual que la cohesión entre granos y estabilidad de la mezcla. Al igual que en caso anterior, debe prestarse especial cuidado al aporte de álcalis provenientes del nuevo material.
- iii. *Polímeros sintéticos*: Son sustancias orgánicas originadas de la mezcla de un material base con un endurecedor. Se emplean en impermeabilizaciones, sellados y recubrimientos, y tienen buenas propiedades: elevadas capacidades mecánicas, baja sensibilidad térmica, cierta elasticidad, y su adherencia con el hormigón es muy buena, logrando prácticamente un monolitismo en la estructura.

Destaca la resina epoxi, adecuada para rehabilitaciones estructurales, que se convierte en un sólido de altas prestaciones cuando polimeriza una mezcla compuesta por un fluido base y un endurecedor. Es posible modificar sus propiedades con adiciones, pero es necesario tener precaución, ya que rebajan las características mecánicas del sólido resultante al evaporarse el agua. A continuación, se adjuntan unas fotografías relativas a la inyección de resina epoxi a presión (Figuras 7.25a, 7.25b y 7.25c).



Figura 7.25a. Inyección de resina en un aliviadero (cortesía de Iberdrola)

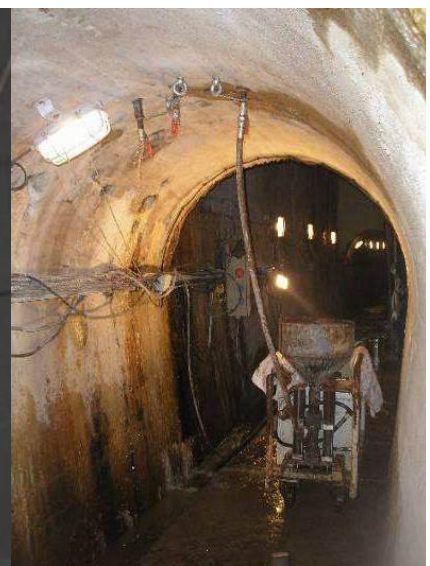


Figura 7.25b. Máquina inyectora de resina en el interior de una galería (cortesía de Iberdrola)



Figura 7.25c. Retoma sellada (cortesía de Iberdrola)

La variedad de productos que hay en el mercado hace altamente aconsejable la realización de ensayos previos de los materiales de inyección de las fisuras, si sus propiedades no son del todo conocidas o su idoneidad es dudosa. En estos ensayos conviene ensayar diferentes materiales con varios espesores de fisuras para tener una certeza de su comportamiento, e identificar la influencia de la viscosidad y de la presión de inyección, así como de la temperatura.

En algunas ocasiones lo más conveniente es emplear dos productos, uno para obturar la vía de agua del tal modo que permita la inyección de resina epoxi sin circulación de agua, y la propia resina que aporte una resistencia estructural. En este caso, conviene realizar pruebas de agua para determinar la zona de entrada del flujo de agua y poder diseñar la inyección de una forma eficiente.

7.2.3. Impermeabilización

- i. *Sistemas adheridos:* Consiste en minorar lo máximo posible la entrada de agua al interior del hormigón de la presa mediante la impermeabilización del paramento aguas arriba empleando para ello productos específicos. Tiene el inconveniente de tener que vaciar el embalse hasta la cota que se desea impermeabilizar, cuestión que puede ser limitativa en determinados casos (Figura 7.26, 7.27 y 7.28).



Figuras 7.26 y 7.27. Impermeabilización de paramento de aguas arriba mediante sistema adherido (cortesía de Iberdrola)



Figura 7.28. Impermeabilización de paramento de aguas arriba mediante sistema adherido (cortesía de Endesa)

Las constantes acciones a las que está expuesto el paramento mojado (insolación, impacto de objetos, subidas y bajadas de embalse, etc.) pueden acortar su vida útil y reducir su efectividad. Además, esta solución no impide la entrada de agua por el cimientó y los estribos, posibilitando la realimentación de la reacción expansiva en el cuerpo de presa.

- ii. Sistemas exentos: La colocación de una geomembrana en el paramento de aguas arriba de la presa previene la entrada de agua al hormigón a través de las fisuras existentes en la zona sumergida. Sin embargo, la humedad existente en el propio hormigón puede ser suficiente para que la reacción expansiva siga desarrollándose.

Estas membranas son bastante eficientes en cuanto a lograr la impermeabilización del paramento, y su colocación en sectores permite el reemplazo de cualquiera de ellos en caso de que resulte dañado. El agua que pueda lograr atravesar la geomembrana suele ser recogida por un dren situado en la parte inferior del paramento. A pesar de sus ventajas, este método tiene inconvenientes importantes como: la dificultad (y en ocasiones inviabilidad) de lograr un desembalse total, el impedimento de la evaporación de la humedad en el paramento, y un obstáculo para poder inspeccionar este y detectar posibles fisuras y su evolución. A continuación, se adjuntan unas fotografías donde se muestra la ejecución de esta solución (Figura 7.29 a 7.31).

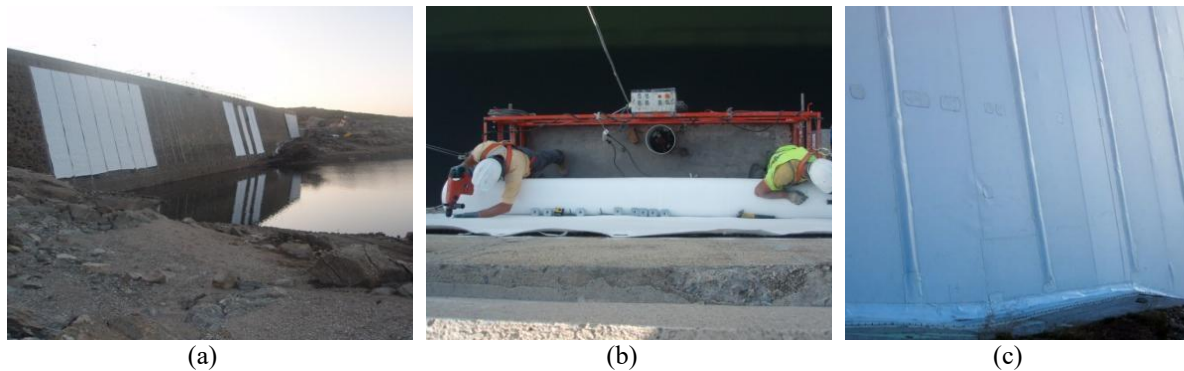


Figura 7.29. Sistema de impermeabilización mediante lámina.
<http://ferpesercon.com>, accessed 2022-01-17)



Figura 7.30. Impermeabilización del paramento de aguas arriba de una presa con lámina (cortesía de Iberdrola)

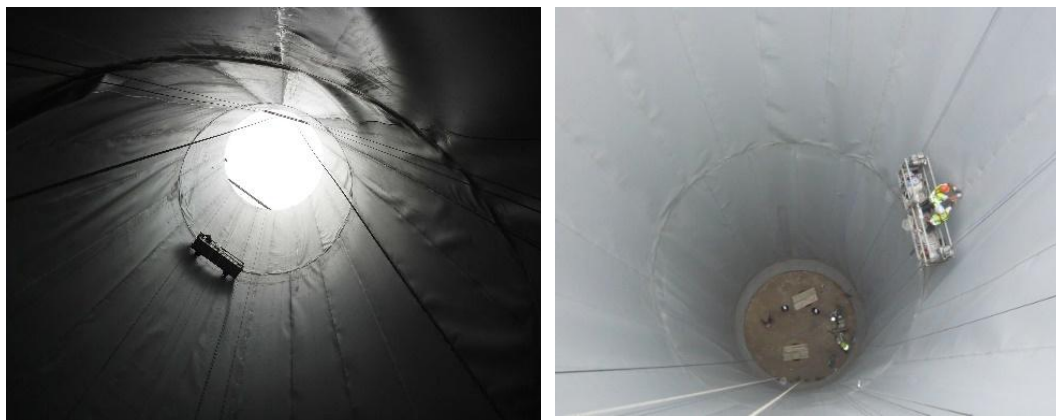


Figura 7.31. Sistema de impermeabilización del interior de una chimenea de equilibrio con lámina (cortesía de Iberdrola)

7.2.4. Cortes de relajación

Consiste en realizar cortes verticales de unos 10-20 mm de anchura en la estructura utilizando para ello un disco radial y/o hilo de diamante para lograr la profundidad requerida. Estos alivian las tensiones debidas a la expansión química, produciéndose una acomodación de la estructura a la nueva situación. Esta solución tiene un efecto a corto plazo, pero no ralentiza ni detiene la reacción química, por lo que esta sigue progresando, al igual que la expansión. Este hecho hace necesarios ciclos de cortes de relajación con una periodicidad función del avance de la reacción.

Para ejecutar esta actuación es preciso realizar un estudio tanto numérico como de caracterización de la patología en la estructura para determinar las ubicaciones y anchura de los cortes, así como su efecto. Asimismo, también debe ser estudiada la solución elegida para el sellado de estos, de gran importancia en presas (Figuras 7.32a y 7.32b), (Figuras 7.33) y (Figuras 7.34a y 7.34b).



(a)

(b)

Figura 7.32. Corte de un muro

(a); disco cortando el hormigón; (b) previo al corte con hilo (cortesía de Iberdrola).



Figura 7.33. Corte del hormigón con hilo de diamante en paramento de presa (cortesía de Naturgy)



Figura 7.34a. Corte del hormigón en paramento de presa (cortesía de Naturgy)



Figura 7.34b. Corte de relajación en presa finalizado. Coronación (Cortesía de E. Menéndez)

7.2.5. Anclajes

Se basa en imponer una fuerza de compresión al hormigón a través de cables de alta resistencia (anclajes activos). En ocasiones, basta con colocar anclajes pasivos (sin fuerza de compresión) para paliar los efectos de la expansión. Estos anclajes entran en tracción al oponerse a los efectos de la expansión en el hormigón.

Esta solución frena la expansión en la dirección de compresión, pero tiene como desventajas que no detiene el desarrollo de la reacción expansiva y puede resultar cara por ser requeridos varios cables (Figuras 7.35a y 7.35b). Al igual que la solución anterior, es necesario hacer un análisis numérico previo para diseñar la tipología de cables y los puntos de anclaje, así como monitorizarlos posteriormente para detectar sobretensiones en ellos.



Figura 7.35a. Anclajes activos en presa
(<https://www.dywidag-formties.com/> Accessed 2022/01/17)

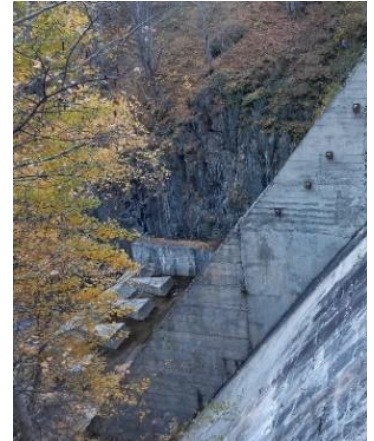


Figura 7.35b. Anclajes pasivos en los cajeros de un aliviadero para contener la deformación por expansión (cortesía de Endesa).

En numerosas ocasiones, especialmente cuando se ha detectado que el fenómeno expansivo está en su fase de propagación, se han ejecutado una combinación de varias de las soluciones descritas anteriormente para tratar de mitigar los efectos ocasionados por la patología, así como para reducir en la medida de lo posible los agentes que intervienen en su desarrollo (Figuras 7.36 y 7.37).



Figura 7.36. Anclajes de acero corrugado pasivado y de fibra de vidrio previos a la inyección (cortesía de Iberdrola)



Figura 7.37 Testigo con anclaje de fibra de vidrio inyectado (cortesía de Iberdrola)

Después de la ejecución de cualquiera de estas actuaciones, es altamente recomendable que se preste especial atención a la monitorización de la respuesta de la estructura. Los modelos matemáticos pueden ser de ayuda para corroborar que la respuesta está siendo la esperada, así como para predecir la evolución del comportamiento.

7.2.6. Sales de litio y otros productos de mitigación

El hidróxido de litio (LiOH) se utiliza para mejorar los efectos de la reacción álcali-sílice en el hormigón. Sin embargo, el uso del hidróxido de litio no está exento de riesgos, ya que puede aumentar la concentración de iones OH⁻ en disolución de la red porosa del hormigón, y su empleo en dosis inadecuadas pueden ocasionar un aumento de la expansión en lugar de una disminución (Folliard, 2003).

Algunas sales de litio casi insolubles, como el fluoruro de litio y el carbonato de litio, son eficaces en dosis elevadas pero generan hidróxido de litio en disolución, lo que reproduce una problemática similar a la indicada en el caso del uso del LiOH. En contraste, el nitrato de litio, que es una sal neutra totalmente soluble, se presenta como una opción que no genera aumentos significativos en la concentración de iones OH⁻. por lo que mediante su empleo no se corre el riesgo de acelerar la reacción de álcali-sílice y simultáneamente mitiga sus efectos expansivos adversos (Diamond, 1999).

Aunque desde la década de 1950 se ha venido estudiando la eficacia de las sales de litio sobre muestras de laboratorio para prevenir la reacción álcali-sílice, aún no se ha establecido completamente su eficacia a largo plazo mediante su implementación en situaciones a escala real. Los resultados a lo largo del tiempo indican que el uso de hidróxido o nitrato de litio puede ser eficaz a largo plazo, dependiendo de la dosificación y la exposición ambiental. (Drimalas, 2012).

Se ha constatado (Malvar, 2002) la eficacia de la incorporación de estas sales de litio durante el amasado del hormigón para mitigar el comportamiento expansivo asociado al desarrollo de la reacción álcali-sílice, siempre que se empleen con la formulación adecuada y en la proporción óptima. En cambio, si las sales de litio se aplican por impregnación sobre la superficie externa y no durante el amasado del hormigón, su penetración es limitada (apenas uno o dos centímetros), lo que puede conseguir reducir la formación de productos expansivos únicamente en una capa situada a un nivel bastante superficial, no así en capas más profundas del hormigón. Esta misma problemática se ha observado con otros productos de reparación aplicados por impregnación externa, mostrándose eficaces como posible solución de mitigación solo en una capa muy superficial (Souza, 2017).

7.3. Verificación de la eficacia de las actuaciones

Antes de llevarse a cabo actuaciones en la presa es conveniente estudiar mediante modelos sus efectos potenciales, especialmente en lo relativo a la seguridad y funcionalidad de la estructura; por ejemplo, comparando la evolución de las deformaciones plásticas con valores admisibles teniendo en cuenta el confinamiento. Los modelos no deben ser necesariamente complicados, pudiendo ser preferible plantear varios modelos sencillos que describan los diferentes aspectos extremos del comportamiento esperable de la presa.

Los modelos estadísticos son, por su propia naturaleza, incapaces de predecir los efectos posteriores de las eventuales actuaciones correctivas ya que se alimentan de los factores medioambientales externos -generalmente fuera del alcance de la intervención- y del propio comportamiento histórico de la estructura anterior a la actuación. Por ello, en las fases previas a las actuaciones, solo cabe ensayar los potenciales efectos con modelos estructurales que incluyan una mayor base física de los mecanismos de la reacción antes y después de la actuación.

La utilidad de los modelos estadísticos se orienta a comprobar si la actuación ha afectado realmente al comportamiento de la estructura. Naturalmente, esto no puede verificarse de manera inmediata: si, por ejemplo, las intervenciones suponen un cambio importante en la rigidez, la componente de los modelos que relaciona los movimientos con las variables ambientales -temperatura y variación del nivel de embalse- dejará de estar bien ajustada y perderá precisión en la respuesta de corto plazo, generalmente en el ciclo anual. Si, por el contrario, las actuaciones afectan a la naturaleza o velocidad de las reacciones expansivas, los modelos estadísticos son útiles para evaluar su eficacia al permitir detectar (o no) cambios en la tendencia subyacente.

Una vez implementadas las actuaciones es conveniente comparar las medidas experimentales (principalmente movimientos) con las predicciones de los modelos, para completar y mejorar estos y así extraer un mayor conocimiento de la presa. Para ello, dentro de lo posible, es recomendable no esperar a la actuación para mejorar el sistema de auscultación (cuando se considera insuficiente), sino hacerlo cuanto antes para evaluar los efectos con mayor nivel de fiabilidad al contrastar los comportamientos antes y después de las actuaciones. Pueden distinguirse varios escenarios de comportamiento que se comentan a continuación.

En algunos casos las actuaciones tratan de reducir la velocidad de reacción, como impermeabilizando paramentos para disminuir la presencia de agua. Las medidas pueden necesitar varios años en evidenciarse y aun así pueden surgir dudas de si la reacción se debe a la cinética de la reacción independientemente de la actuación.

En otros casos la reacción continúa e incluso es posible que la expansión aumente muy rápidamente para luego progresar más moderadamente a una velocidad que puede ser mayor que la previa a la medida. Esto ocurre habitualmente en el corte de presas, donde además puede cambiar la forma en la que se mueve la presa. Las simulaciones, mejoradas con los datos de auscultación, permiten estimar el tiempo necesario para que se cierren las juntas

inducidas y la necesidad de volver a cortar. Un modelo predictivo debería considerar: la presencia de geles que todavía no se han hidratado produciendo expansión; el cambio en la movilidad de los reactivos al cambiar el estado tensional; y el comportamiento mecánico instantáneo y la fluencia del hormigón.

Por otra parte, aunque los cortes se han usado en presas de gravedad, tampoco son descartables a priori en presas bóveda para liberar tensiones y tras el cierre de las juntas volver a adquirir un comportamiento monolítico. En este caso, la modelización adecuada de la presa es fundamental para valorar la actuación, ya que puede no notarse un cambio significativo en la evolución de los movimientos, aunque las tensiones se hayan relajado. Esta valoración puede contrastarse con medidas localizadas con células de presión, teniendo en cuenta el nivel de precisión de estas medidas.

7.4. Bibliografía

Agullo Fite, L (1991): *Estudio térmico en presas de hormigón frente a la acción térmica ambiental*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

Diamond, S., (1999): "Unique response of LiNO_3 as an alkali silica reaction-preventive admixture", *Cement and Concrete Research*, 29; pp.1271–1275. USA; DOI:org/10.1016/S0008-8846(99)00115-5

Drimalas, T.; Ideker, J.H., Bentivegna, A.F., Folliard, K.J., Fournier, B. and Thomas, M.A.D, (2012): "The Long-Term Monitoring of Large-Scale Concrete Specimens Containing Lithium Salts to Mitigate Alkali-Silica Reaction" American Concrete Institute, ACI, *Symposium Paper, Volume: 289*, DOI: 10.14359/51684267

Folliard, K., Thomas, M.D.A., and Kurtis, K. (2003): "Guidelines for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent ASR in Concrete" Federal Highway Administration, *Publication No. FHWA-RD-03-047*, Washington, DC, July 2003, (<http://www.tfhr.gov/pavement/pccp/pubs/03047>)

Malvar L.J.; Cline G.D.; Burke D.F.; Rollings R.; Sherman T.W. and Greene J.L. (2002): "Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations" *Mater. J.*, 99, pp. 480-489

Souza, L.M.S.; Polder, R.B. and Çopuroğlu, O. (2017): "Lithium migration in a two-chamber set-up as treatment against expansion due to alkali-silica reaction", *Construction and Building Materials*, Volume 134, pp. 324-335, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.052>