



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESIINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Estudio del diagnóstico y del tratamiento
de presas de hormigón con expansiones**

Autor/a

Francesc Pardo Bosch

Tutor/a

Antonio Aguado de Cea

Departament

Enginyeria de la Construcció

Intensificació

Tecnologia i construcció d'estructures

Data

10 de juliol de 2009

Resumen

Estudio del diagnóstico y del tratamiento de presas de hormigón con expansiones

Autor: Francesc Pardo Bosch
Tutor: Dr. Antonio Aguado de Cea

El objetivo principal de esta tesina es el estudio y análisis detallado de presas de hormigón con expansiones.

Este documento engloba de forma clara y concisa los conceptos básicos que debe conocer un ingeniero, principalmente los que se dedican a explotación, para afrontar con garantías los fenómenos expansivos que puedan presentarse en una presa.

Previa presentación de los fenómenos químicos causantes de la expansión, el texto incorpora una serie de recomendaciones a seguir, primero, para instrumentar correctamente la presa, y segundo, para diagnosticar y tratar la presa expansiva con garantías. Para tratar con eficiencia una patología se debe realizar un diagnóstico con extremo cuidado y exactitud.

Para efectuar éste diagnóstico se propone una metodología global de análisis de la presa, para establecer una política de toma de decisiones.

Establecidos los cimientos para una correcta interpretación de los síntomas y para su consiguiente diagnóstico, el texto presenta los tratamientos más adecuados para mitigar los problemas que aparecen en las presas derivados de las reacciones expansivas.

Finalmente la tesina incorpora dos anejos. El primero anejo presenta una tabla donde aparecen 102 presas expansivas con sus principales síntomas y el tratamiento que se les ha aplicado. El segundo anejo, por su parte, es la BASE DE DATOS DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES, elaborada con Access 2008 y Visaul Basic, donde se publican las presas españolas donde se ha constatado que existe una expansión.

Abstract

Study of the diagnosis and treatment of concrete dams with expansions

Author: Francesc Pardo Bosch
Tutor: Dr. Antonio Aguado de Cea

The main objective of this dissertation is to study and analyze in detail expansions of concrete dams.

This document includes in a clear and concise way the basic concepts an engineer should know, especially those in the exploitation sector, in order to deal with expansive phenomena that may arise in a dam.

After a presentation of the chemical phenomena causing the expansion, the text incorporates a number of recommendations to follow: first, to implement correctly the dam, and then, to diagnose and treat the dam with guarantees. A disease diagnosis must be made with extreme care and accuracy so as to carry out an efficient treatment.

In this regard, a global analysis of the dam is proposed as a methodology to establish a decision-making policy.

Set the foundation and criteria for a correct interpretation of symptoms and subsequent diagnosis, the text presents the most appropriate treatment to mitigate the problems that appear in dams due to expansive reactions.

Finally, this minor thesis includes two annexes. The first annex provides a table where 102 dams with expansions are presented, including its main symptoms and the treatment that has been applied. The second annex includes a DATABASE OF CONCRETE DAMS WITH EXPANSIONS, developed with Access 2008 and Visual Basic, where Spanish dams with expansive reactions are presented.

*Per tu avi,
des del cel m'has guiat fins aquí.*

Agradecimientos

Esta tesina representa el final de un ciclo, de un camino que se ha recorrido durante cinco largos cursos. En todo este periodo he recibido la colaboración desinteresada de un gran número de personas. Quisiere aprovechar estas líneas para agradecerles su apoyo y comprensión.

Mis primeras palabras de agradecimiento son para mí tutor, el Dr. Antonio Aguado de Cea, su compromiso, sus consejos y su paciencia han sido cruciales para poder elaborar el documento que aquí se presenta.

Es justo recordar, ahora, la ayuda recibida por parte de todo el equipo de presas que dirige el Dr. Aguado, y en su extensión a todas las personas que forman el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC, especialmente quisiera agradecer al Dr. Luís Agulló la colaboración que me brindó, junto a mí tutor, en el diseño y elaboración de la base de datos. No quiero olvidarme, en este punto, del Sr. Marc de la Fuente, el ha sido en todo momento mi consejero informático.

A mis amigos agradecerles que sean como son, y agradecerles, también, el hecho de que siempre estén en el lugar y en el momento en que los necesito, especialmente a Ana y a Pau, que además de ser mis amigos son mis queridos compañeros.

Finalmente quiero dedicar unas palabras a mis padres y a toda mi familia. Os quiero decir que estoy muy agradecido por el apoyo y por los ánimos que me habéis dado durante todo este tiempo. También os quiero pedir perdón por dos cosas, porqué se que habéis sufrido en silencio, y por el tiempo que he dejado de compartir con vosotros para dedicarlo a menesteres relacionados con esta gran titulación.

De todo corazón, Muchas gracias.

Índice general

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- PRESENTACIÓN.....	1
1.2.- OBJETIVOS.....	3
1.3.- METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO 2. LAS REACCIONES EXPANSIVAS.....	7
2.1.- INTRODUCCIÓN.....	7
2.2.- LAS REACCIONES QUÍMICAS.....	7
2.2.1.- Reacciones álcali-sílice (ASR).....	8
2.2.1.1.- La influencia de los áridos.....	10
2.2.2.- Reacciones álcali-carbonato (ACR).....	11
2.2.3.- Factores externos influyentes en ASR y ACR	14
2.2.4.- Ataque sulfático.....	15
CAPÍTULO 3.- LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PRESA.....	19
3.1.- INTRODUCCIÓN.....	19
3.2.- LA IMPORTANCIA DE LA INSTRUMENTACIÓN.....	19
3.3.- LA INSTRUMENTACIÓN DE PRESAS.....	21
3.4.- LOS INSTRUMENTOS Y LAS MAGNITUDES CONTROLADAS EN PRESAS DE HORMIGÓN SUSCEPTIBLES DE PADECER EXPANSIONES.....	23
3.4.1.-Temperatura.....	23
3.4.2.-Comportamiento de la juntas de contracción	23
3.4.3.- Comportamiento mecánico del hormigón de la presa.....	23
3.4.4.- Control de movimiento de la estructura y su cimentación.....	24
3.4.5.- Control de subpresión.....	25
3.4.6.- Filtraciones.....	25
3.5.- FRECUENCIA DE LECTURA.....	25
3.6.- REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	26
3.7.- UNA NUEVA GENERACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN.....	29

3.7.1.- Estación topográfica total automatizada.....	29
3.7.1.1- Principales ventajas de la estación topográfica total automatizada.....	30
3.7.1.2- Principales inconvenientes de la estación topográfica total automatizada.....	30
3.7.2.- Laser Scanning.....	30

CAPÍTULO 4.- SINTOMATOLOGÍA Y DIAGNÓSTICO DE LAS REACCIONES EXPANSIVAS EN PRESAS.....

4.1.- INTRODUCCIÓN.....	33
4.2.- SINTOMATOLOGÍA.....	33
4.2.1.-Fisuración.....	34
4.2.2.- Productos de la reacción.....	38
4.2.3.- Movimientos remanentes.....	38
4.2.4.- Variación de la apertura de juntas.....	39
4.2.5.- Problemas en el funcionamiento de equipos.....	40
4.3.- DIAGNÓSTICO. SISTEMÁTICA DE TRABAJO.....	40
4.3.1.- Consideraciones generales.....	41
4.3.2.-Trabajos iniciales.....	43
4.3.2.1.- Análisis de la documentación histórica de la presa.....	43
4.3.2.2.- Estudio teórico de la formación geológica.....	43
4.3.3.- Visita e inspección de la presa y de su entorno.....	43
4.3.3.1.- Inspección de la formación geológica.....	46
4.3.3.2.- Inspección de obras del entorno.....	46
4.3.3.3.- Inspección de los elementos auxiliares y del cuerpo de presa.....	46
4.3.4.- Campaña experimental.....	47
4.3.4.1.- Ensayos en áridos y en hormigón fabricado en laboratorio... ..	48
4.3.4.1.1.- Álcali-sílice.....	48
4.3.4.1.2.- Álcali-carbonato.....	49
4.3.4.1.3.- Ataque sulfático.....	50
4.3.4.2.- Ensayos en testigos de hormigón.....	51
4.3.4.2.1.- Álcali-sílice.....	51
4.3.4.2.2.- Álcali-carbonato.....	53
4.3.4.2.3.- Ataque sulfático.....	53
4.3.4.3.- Ensayos experimentales en fisuras de la presa.....	54
4.3.5.- Estudios analíticos y numéricos.....	55
4.3.5.1.- Estudios de microescala.....	55
4.3.5.2.- Estudios de mesoescala.....	55

4.3.5.3.- Estudios de macroescala.....	56
4.3.5.3.1.- Modelos numéricos.....	56
4.3.5.3.2.- Análisis de los datos recogidos por el sistema de auscultación.....	56
CAPÍTULO 5.- TRATAMIENTO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.....	59
5.1.- INTRODUCCIÓN.....	59
5.2.- TRATAMIENTO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.....	60
5.2.1.- Medidas pasivas frente a la expansión del hormigón.....	60
5.2.1.1.- Abandono de la presa.....	60
5.2.1.2.- Ausencia de actuación.....	61
5.2.1.2.1.- Gene Wash.....	63
5.2.1.3.- Reparaciones Superficiales.....	64
5.2.2.- Actuaciones dirigidas a frenar la expansión del hormigón.....	65
5.2.2.1.- Impermeabilizar.....	65
5.2.2.1.1.- La impermeabilización de San Esteban.....	66
5.2.2.2.- Tratamiento de fisuras.....	68
5.2.2.2.1.- Inyección de resinas epoxi.....	69
5.2.2.2.2.- Inyección de resinas de uretanos.....	71
5.2.2.2.3.- Llenado con mortero.....	72
5.2.2.3.- Tratamiento de las juntas de la presa.....	73
5.2.3.- Actuaciones dirigidas a corregir los problemas derivados de la expansión del hormigón.....	74
5.2.3.1.- Instalación de anclajes.....	74
5.2.3.1.1.- Anclajes activos o postesados.....	74
5.2.3.1.2.- Protección contra la corrosión.....	76
5.2.3.2.- Refuerzo de hormigón con cambio de sección.....	76
5.2.3.2.1.- Mequinenza.....	77
5.2.3.3.- Corte de hormigón con hilo de diamantes.....	77
5.2.3.3.1.- Presa de Mactaquac	80
5.2.3.3.2.- Presa de Chambon.....	82
5.2.3.3.3.- La presa de Pian Telessio.....	83
5.2.3.3.4.- La difícil predicción del futuro.....	86
5.3.- PREVENCIÓN ANTE UNA POSIBLE REACCIÓN EXPANSIVA.....	87
5.4.1.- Puzolanas.....	88
5.4.1.1.- Humo de sílice.....	88
5.4.1.2.- Cenizas Volantes.....	89

5.4.1.3.- Puzolanas naturales.....	89
5.4.2.- Escoria de alto horno.....	90
5.4.3.- Otra ventaja de las adiciones.....	91
CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES.....	93
6.1.- INTRODUCCIÓN.....	93
6.2.- CONCLUSIONES GENERALES.....	93
6.3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	94
6.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	97
6.5.- VALORACIÓN DEL ESTUDIO REALIZADO.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEJO 1.- PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.....	105
A1.1.- INTRODUCCIÓN.....	105
A1.2.- QUADRO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.....	106
A1.3.- ESTADÍSTICA DE UTILIZACIÓN DE TRATAMIENTOS.....	115
ANEJO 2.- BASE DE DATOS DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANIONES.....	117
A2.1.- INTRODUCCIÓN.....	117

Índice de figuras y tablas

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. LAS REACCIONES EXPANSIVAS

2.1- Neutralización por NaOH de grupos silanol ácidos (Dent Glasser y Kataoka,1981).....	9
2.2- Ruptura por NaOH de puentes siloxano (Dent Glasser y Kataoka,1981).....	9
2.3- Esquema del proceso de expansión por ARS (Garcés et al., 2007).....	10
2.4- Gráfica efecto pésimo.....	11
2.5- Esquema del proceso que da lugar a la expansión (Parra, 2004).....	13
2.6- Burcita con fisuras en microscopio (Garcés et al., 2007).....	13
2.7- Burcita con fisuras en microscopio (Garcés et al., 2007).....	13
2.8- Influencia del contenido de C ₃ A en el cemento sobre las expansiones causadas por el ataque sulfático.....	16
2.9- Efectos padecidos por el hormigón en medios sulfatados.....	16
2.10- Imagen de los sulfuros de hierro en el árido (Aguado et al. 1998).....	17
2.11- Evolución del fenómeno expansivo debido al ataque sulfático (Araújo et al. 2008).....	18

CAPÍTULO 3.- LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PRESA

3.1- Organigrama del ciclo de de análisis e interpretación del comportamiento de una estructura general.....	20
3.2- Termómetro termopar digital.....	23
3.3- Defórmetro usado para control de Juntas.....	23
3.4- Sistema de auscultación teórico de una presa de hormigón.....	24
3.5- Péndulo directo de la presa de la Baells.....	25
3.6- Péndulo indirecto de la presa de la Baells.....	25
3.7- Esquema de análisis de los datos obtenidos de la instrumentación.....	27
3.8- Interpretación errónea de las deformaciones en Isola (Lombardi, 2006).....	28
3.9- Interpretación correcta de los movimientos que se dieron en la presa de Isola debidos a la reacción álcali-silicato (Lombardi, 2006).....	28
3.10- Movimientos totales registrados en la presa de Isola (Lombardi, 2006).....	28
3.11- Estación total automatizada.....	29

CAPÍTULO 4.- SINTOMATOLOGÍA Y DIAGNÓSTICO DE LAS ACCIONES EXPANSIVAS EN PRESAS

4.1- Fisuración mapeada.....	36
4.2- Detalle de la figura 4.1.....	36
4.3- Dientes de pie de presa con fisuración enramada (Araújo, 2008).....	36
4.4- Fisura horizontal en el acceso a la galería de Graus (Araújo, 2008).....	36
4.5- En rojo discontinuo podemos ver la traza de una fisura en galería provocada por torsión.....	36
4.6- Esquema de los movimientos relativos entre bloques que podrían generar torsión en una presa. El bloque derecho, se mueve, en relación al movimiento de los bloques que quedan a su izquierda, hacia atrás (pudiendo ir hacia aguas arriba o aguas abajo) y hacia arriba.....	37
4.7- Fisura en un paramento de galería.....	37
4.8- Fisura en la parte más alta de la galería.....	37
4.9- Gel producto de la reacción álcali-sílice de la presa de Belesar (Herrador,2002).....	38
4.10- Productos de la reacción en la presa de San Esteban.....	38
4.11- Evolución en el tiempo de los movimientos de nivelación y colimación en coronación en la presa de Paso Nuevo (Espinós et al., 2008).....	39
4.12- Desajuste del raíl de San Esteban causado por los movimientos remanentes...	39
4.13- Barandilla curvada en la presa de Rumedo.....	39
4.14- Movimiento relativo entre dos bloques de San Esteban.....	40
4.15- Movimiento relativo entre dos bloques de San Esteban.....	40
4.16- Vista aérea del movimiento relativo entre bloques.....	40
4.17- Movimiento de la junta longitudinal de la presa de Rumedo.....	40
4.18- Organigrama de las etapas de estudio.....	42
4.19- Organigrama de las etapas del estudio geológico.....	44
4.20- Organigrama de la visita a la presa.....	45
4.21- Organigrama de la inspección de la presa.....	47
4.22- Impulso transmitido a través del elemento.....	54
4.23- Señal del osciloscopio.....	54
4.24- Esquema de paso de la micro escala a la masoescala, (Aguado et al. ,1998)...	57

CAPÍTULO 5.- TRATAMIENTO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES

5.1- Imagen del arco roto de Fonsagrada (Guerreiro et al., 1991).....	60
5.2- Alto Ceira abandonada.....	60
5.3- Tiempo de latencia y tiempo característico (Larive, 1998).....	62
5.4- Movimientos de Graus (Araújo et al, 2008).....	63
5.5- Movimientos de Tabescán (Araújo et al, 2008).....	63

5.6- Registros de los sistemas de auscultación (Gil y Cajete, 1991).....	67
5.7- Esquema del tratamiento realizado en San Esteban (Gil y Cajete, 1991).....	67
5.8- Zona impermeabilizada (Gil y Cajete, 1991).....	67
5.9- Estado actual del paramento impermeabilizado en San Esteban	68
5.10- Esquema del grupo carbamidato.....	71
5.11- Presa en construcción donde se observan, en rojo, las juntas de bloques y, en azul, las juntas longitudinales. (Pujol, 2008).....	73
5.12- Esquema de las partes de un anclaje activo genérico (Ucar, 2005).....	75
5.13- Instalación de un anclaje en la presa de Val del Mare (ICOLD, 1991).....	76
5.14- Sección de Mequinenza, en línea discontinua la presa sin el refuerzo (Vallarino, 1972).....	77
5.15- Gráfico resumen del anejo 1. Porcentaje (%) con el que se presentan los distintos tipos de intervención en una presa.....	78
5.16- Dispositivo técnico necesario para realizar los cortes de hormigón.....	79
5.17- Esquema de hilo de diamante (Marcello el al., 2006).....	79
5.18- Maquinaria necesaria en coronación para efectuar el corte (Marcello el al., 2006).....	80
5.19- Paramento aguas arriba. Junta reabierto, con un corte (Marcello el al., 2006).....	80
5.20- Esquema en planta de la presa de Mactaquac (Thompson et al., 1994).....	80
5.21- Desde aguas abajo, situación de las unidades de la presa (Thompson et al., 1994).....	81
5.22- Sección transversal del corte realizado (Thompson et al., 1994).....	81
5.23- Registros de los extensómetros (Thompson et al., 1994).....	82
5.24- Registros de los péndulos (Thompson et al., 1994).....	82
5.25- Esfuerzos medidos (Thompson et al., 1994).....	82
5.26- Movimientos verticales.....	83
5.27- Movimientos hacia aguas arriba (Bourdarot, 2006).....	83
5.28- Distribución de los cortes realizados (Bourdarot, 2006).....	83
5.29- Movimientos en coronación (Amberg, 2007).....	84
5.30- Fisura de la galería superior (Amberg, 2007).....	84
5.31- Esquema de la fisura anterior (Amberg, 2007).....	84
5.32- Ubicación de los cortes (Amberg, 2007).....	85
5.33- Esquema de la realización de los cortes (Amberg, 2007).....	85
5.34- Tipo de adiciones minerales	88
5.35- Expansión por inmersión en NaCl (Piagni, 1997).....	89
5.36- Curvas de expansión de las barras de mortero (Valdez et al., 2008).....	90
5.37- Curvas de expansión debidas a una reacción álcali árido (Becker, 2002).....	91
5.38- Curvas de expansión ante un ataque sulfático (ACI, 1996).....	91

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. LAS REACCIONES EXPANSIVAS

2.1- Listado de minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento.....	12
--	----

CAPÍTULO 3.- LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PRESA

3.1- Clase de presas según instrumentación.....	21
3.2- Magnitudes a medir en ambiente.....	22
3.3- Magnitudes a medir en el cuerpo de la presa.....	22
3.4- Magnitudes a medir en la cimentación de la presa.....	22
3.5- Típica incertidumbre instrumental proporcionada por el fabricante.....	30

CAPÍTULO 5.- TRATAMIENTO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES

5.1- Características de las puzolanas.....	90
--	----

Capítulo 1

Introducción

1.1.- PRESENTACIÓN

Las presas son las más singulares de las obras civiles, éstas tienen, sin lugar a duda, mayor incidencia sobre la sociedad que ninguna otra de las obras públicas que haya podido concebir el hombre.

Si analizamos la relación de las presas con la sociedad, se puede ver que las primeras generan una serie de beneficios en la población (abastecimiento de agua, creación de energía renovable, control de avenidas...), pero también se pueden encontrar con unas repercusiones, sobre la sociedad, que se pueden considerar menos favorables, por decirlo de alguna manera (inundación de extensas aéreas, desplazamiento de poblaciones, eliminación de fauna i flora...), pero sin lugar a duda las consecuencias más negativas derivadas de la construcción de una presa vienen inducidas por los fallos estructurales que podrían suponer la rotura de la misma.

Las presas son estructuras muy seguras. Según el ICOLD, International Commission on Large Dams, la probabilidad de su rotura era del 2% en las presas construidas antes de 1950 y del 0,5 para las construidas en el período 1951-1986. En tiempos más recientes este porcentaje ha descendido al 0,2%. Si bien el riesgo es pequeño, la catástrofe, humana, ambiental, y también, económica, que puede generar la destrucción de una presa es, sin duda, mucho mayor que la que puede generar la rotura de la gran mayoría de obras ingenieriles, quizás sólo las centrales nucleares pueden ocasionar daños mayores, y por eso se deben estudiar los fenómenos que ocasionan su deterioro.

Es en este punto cuando la reflexión induce a preguntar que puede ocasionar la rotura o colapso de una presa. El envejecimiento es el mayor de los problemas con el que hoy en día una presa se puede encontrar. El envejecimiento son las modificaciones en el tiempo de las propiedades geométricas, físicas, mecánicas hidráulicas... que pueden afectar a la seguridad de una presa.

El ICOLD, consciente de todo lo expuesto con anterioridad, da especial importancia al estudio de la temática citada, porque hay en el mundo gran número de presas, construidas de hormigón y mampostería, que están en un grave proceso de envejecimiento, por lo que las consecuencias y remedios son necesarios conocer y evaluar, tanto por los servicios que en estos momentos están realizando como por los problemas que pueden ocasionar al gran número de países afectados. Por todo ello, este organismo, dedicó en el XXI Congreso Internacional de Grandes Presas, realizado en Montreal en el año 2004 la Q82 “Envejecimiento y rehabilitación de las presas de hormigón y mampostería y de sus obras complementarias” al debate de este tema. Esta, pero, no es una preocupación reciente para el ICOLD, este organismo ya desde hace algún tiempo viene dedicándole un espacio importante en sus congresos. Sin ánimo de ser exhaustivos, dejen que se enumeren algunos ejemplos: en el Congreso de Estambul realizado el año 1967 se trató el deterioro y envejecimiento de las presas en la Q.39, en 1991, el Congreso de Viena, en su Q65, trató directamente el envejecimiento de las presas y sus medidas de corrección, también en el Congreso de Durba en 1994 la Q.71 se trató del deterioro de aliviaderos y desagües.

La comunidad internacional, no solo ha tratado el envejecimiento de las presas mediante las aportaciones realizadas por el ICOLD i sus congresos, buena muestra de ello son por ejemplo: el boletín publicado el año 1988 por el comité técnico “Deterioration of Dams and Reservoir”, donde ya se expresaba que el 15% de las grandes presas del mundo estaban afectadas por el envejecimiento, además tenemos el boletín “Ageing Dams and Appoartenant works” que concluyó en el año 1993 que el envejecimiento era la mayor causa de deterioro de las presas y de sus obras auxiliares.

Centrándonos en las presas de hormigón se puede decir que el envejecimiento de éste puede deberse a causas diversas, como son la acción del los ciclos hielo-deshielo, la agresión química, la abrasión, la corrosión del acero y las reacciones químicas con los áridos. Esta última causa, es decir, las reacciones químicas, dan lugar a una inestabilidad del hormigón, generando expansiones que pueden prolongarse durante muchos años. Aún así, la comunidad científica no las ha estudiado con el ímpetu y el detenimiento que hubiese sido deseable, detenimiento e interés que si han despertado otras patologías estructurales. Esta problemática es más frecuente de lo que se piensa habitualmente, y es una temática muy importante en la explotación de las presas, que hay que controlar y corregir, porque ya ha dado lugar a problemas muy graves, incluso ha llevado al abandono de alguna obra.

La construcción de estructuras de hormigón de grandes volúmenes, como son las presas, en las que los áridos generalmente proceden de las zonas próximas a la obra, puede implicar el uso de áridos inadecuados que con el paso del tiempo conducen al desarrollo de expansiones y, por consiguiente, a la introducción de acciones no previstas en la estructura, Ayora *et al.* (1998).

Las reacciones químicas que causan la expansión del hormigón pueden ser clasificadas en tres categorías: reacciones álcali-sílice (ASR), reacciones álcali-carbonato (ACR) i ataque sulfático. Estas tres reacciones, aunque presenten ciertos síntomas y ciertas consecuencias comunes en el hormigón, son independientes y como tales muy diversas entre sí.

La reacción álcali-sílice es la reacción más importante. En comparación con las patologías debidas a la ASR, los problemas de ataque sulfático o la reacción álcali-carbonato (ACR) son minoritarios en los hormigones de presas. Conscientes de este hecho, no hay que descuidar el estudio de estas dos tipologías minoritarias, tan dañinas como la primera.

En la actualidad, el número de presas de hormigón de que se tienen constancia que están afectadas por estas reacciones que dan lugar a fenómenos expansivos es cada vez mayor. El envejecimiento es un proceso que, obviamente, se acentúa a medida que se suceden los años, pero este no es el único motivo por el cual crece este número. Hoy en día, los avances tecnológicos en el sector de las presas son cada vez mayores, y esto permite que los fenómenos expansivos sean más evidentes para los expertos, lo cual no quiere decir que sean de fácil detección.

1.2.- OBJETIVOS

El aumento del número presas afectadas por las expansiones del hormigón que forma parte de su estructura es una realidad evidente. La situación actual ha llevado a las empresas propietarias de las presas a tener la necesidad de dar respuesta a la problemática existente, encontrándose, pero, que las investigaciones realizadas por la comunidad científico-técnica aún están poco desarrolladas. En este panorama es donde nace y se desarrolla el proyecto Horex, donde queda encuadrada esta tesina de especialidad, un proyecto de Iberdrola que tienen como objetivo investigar el fenómeno de expansión química en hormigones de presas.

El objeto de esta tesina es presentar un nuevo trabajo de investigación que se inspira y da continuidad a los pioneros trabajos desarrollados tanto por Segarra en su tesina de final de carrera como por Araújo en su tesis doctoral. Ambos realizados en el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC.

En el estudio de este tipo de patología del hormigón nos podemos encontrar con dos realidades distintas: la primera, y más habitual, corresponde a una presa en explotación que presenta un problema de expansión, la segunda, hoy en día más difícil de encontrar, pero no por ello improbable, corresponde a la proyección i construcción de una presa de hormigón hecha con áridos reactivos.

Evidentemente, las dos realidades presentadas en el párrafo anterior, por distintas que son, se deben afrontar de maneras diversas, la primera realidad debe desarrollar un método de intervención y mejora de la presa en explotación, en cambio la segunda debe desarrollar un método preventivo frente a la expansión del hormigón.

El propósito de este estudio se enmarca, por tanto, en la necesidad práctica de poner solución a la problemática de la expansión del hormigón en presas. La intención que se persigue es afrontar ambas realidades existentes para poderse presentar este estudio como una herramienta útil en el seno de todo el sector.

Para poder alcanzar el objetivo marcado se han trazado unas líneas de trabajo claras con la intención de dar una visión de la problemática que permita:

- 1- Visualizar de forma genérica la formulación de las reacciones, conociendo así los reactivos que intervienen y los factores que inciden en la cinética de las mismas, para poder actuar con conocimiento de causa.
- 2- Determinar los sistemas de instrumentación a instalar en presas de hormigón para la detección de problemas que pueden ser asociados a las reacciones expansivas.
- 3- Estudiar la sintomatología que presentan presas y centrales hidroeléctricas de todo el mundo que sufren expansiones de su hormigón, para fomentar el rápido diagnóstico de la patología y así su inmediata intervención.
- 4- Valorar las consecuencias de las reacciones expansivas del hormigón mediante el estudio y análisis de los casos que, hoy día, ya han sido detectados y tratados por los expertos del sector.
- 5- Enumerar y evaluar posibles tratamientos correctores que puedan implementarse en presas y centrales hidroeléctricas con la intención de no alterar su régimen normal de explotación, sirviéndonos también de experiencias pasadas.
- 6- Enumerar y evaluar posibles medidas preventivas, aplicables en la fase de construcción de una presa de hormigón, que pueden evitar que se manifiesten a posteriori las reacciones expansivas.
- 7- Redactar un documento que pueda servir como pauta para afrontar y resolver, con una serie de recomendaciones, la problemática de las reacciones expansivas del hormigón en presas tanto para el ingeniero proyectista como para el ingeniero de explotación.

1.3.- METODOLOGÍA

Esta tesina está estructurada en 6 Capítulos, el primero de los cuales corresponde a esta introducción, y 2 Anejos,

Es imposible plantearse la resolución del grave problema de la expansión sin antes conocer el problema químico que genera tal patología. El **capítulo 2** de este estudio está dedicado al conocimiento químico de la problemática, no se va a realizar una descripción exhaustiva, al ser esta una problemática ya descrita en profundidad por otros autores, pero sí que se tratará porqué no por haber sido tratada con anterioridad es conocida por todos. Este texto además pretende presentar un descripción ligera y comprensible para todos aquellos que no son expertos químicos pero que si tienen nociones sobre reacciones química. Las reacciones presentadas con anterioridad y que son las causantes de las expansiones serán las protagonistas de este apartado.

Las presas son unas estructuras muy completas, de las más completas, su funcionamiento y su evolución con el paso del tiempo han de ser controlados y evaluados. El **capítulo 3** se destina al estudio de la instrumentación que ha de tener una presa de hormigón. Auscultar una presa mediante una instrumentación óptima puede permitir

detectar patologías sufridas por las presas, como es el caso de las expansiones, con el margen necesario para poder afrontar el problema con garantías de solucionarlo.

El **capítulo 4** se refiere a la sintomatología y diagnóstico de las reacciones expansivas. Conocer bien los síntomas que presenta cada una de las reacciones es la clave para realizar un diagnóstico exitoso. La existencia de tres reacciones distintas genera que puedan presentarse síntomas de expansión diversos. Las presas, pero, pueden presentar una sintomatología parecida aún padeciendo una problemática diversa, lo que puede inducir a la confusión de quien la detecta, tal confusión puede desembocar en un diagnóstico erróneo y esto podría traer consecuencias negativas.

Al ser la rehabilitación y el mantenimiento las tareas más importantes a realizar durante la vida de la presa, el **capítulo 5** está dedicado, precisamente, a los procedimientos de tratamiento que pueden usarse para corregir las patologías en las presas de hormigón que padecen expansiones. La literatura reciente presenta gran número de medidas correctoras, por lo que no es fácil, cuando se presenta un nuevo problema dirimir cual es la más aconsejable, ya que la mayoría presentan ventajas e inconvenientes, técnicas y económicas, por igual, de ahí que surja la necesidad de determinar unas claves que permitan una fácil elección. Como se ha detallado anteriormente otro de los objetivos del presente estudio es evitar, en la medida de lo posible, las reacciones expansivas en presas que se vayan a construir en el futuro, por este motivo en este capítulo se presentan una serie de medidas para la fabricación del hormigón que deben tenerse en cuenta de antemano en los proyectos.

En el **capítulo 6** se realiza una valoración del estudio realizado con las conclusiones extraídas, proponiéndose además futuras líneas de investigación que deberían permitir aumentar los conocimientos relativos a las reacciones expansivas en presas de hormigón.

Los anejos presentados son dos, el **Anejo 1** es una tabla resumen de presas de hormigón con expansiones de diferentes países, donde se presenta además de los síntomas manifestados la solución adoptada para hacer frente al fenómeno expansivo.

En el **Anejo 2** se presenta la *Base de datos de presas de hormigón con expansiones*, elaborada para esta tesina en el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC con la colaboración de importantes empresas del sector como: Endesa Generación, Iberdrola Generación, Instituto Torroja y Principia.

Capítulo 2

Las reacciones expansivas

2.1.- INTRODUCCIÓN

Las reacciones químicas expansivas representan uno de los mayores procesos de degradación del hormigón. Podemos hablar de tres tipos distintos de reacciones químicas que dan lugar a fenómenos expansivos en los hormigones de las presas: reacciones álcali-sílice (ASR), reacciones álcali-carbonato (ACR) y ataque sulfático.

Este capítulo pretende introducir al lector al problema químico pues para poder afrontar una problemática de estas características es conveniente conocer su origen. No se pretende realizar un trabajo propio del sector químico, se pretende, tan sólo, presentar las principales características de las reacciones que producen la expansión para mostrar al ingeniero una visión global del por qué de esta patología.

2.2.- LAS REACCIONES QUÍMICAS

Antes de entrar de lleno en el desarrollo teórico de las reacciones expansivas, permitan que se haga una breve descripción del entorno en el que estas se desarrollan, es decir, una descripción de la composición del hormigón, pues es ésta quien determinará, en gran medida, el grado de expansión.

El hormigón es el material resultante de la mezcla de un conglomerante con áridos y con agua, siendo el conglomerante su componente principal. Puesto que en las secciones siguientes vienen detalladas las reacciones según los distintos áridos que participan en ellas, el texto se centra, en los primeros párrafos, en describir el clinker, el principal componente del mencionado conglomerante.

El clinker está formado principalmente por cuatro compuestos: dos silicatos, C_3S (silicato tricálcico) y C_2S (silicato bicálcico), y dos aluminatos, C_3A (aluminato tetracálcico) y C_4AF (aluminato ferrito tetracálcico), que reaccionan con el agua de la masa durante el proceso de hidratación.

Los dos silicatos forman el gel de cemento, dando como resultado un silicato de calcio hidratado C-S-H. Este silicato observado en el microscopio aparece como un conjunto de folios muy delgados que curvados sobre ellos mismos forman unos cilindros muy delgados y bastante largos.

Esta cristalización lanceolada recubre progresivamente los granos de cemento anhidro que genera una estructura con capacidad para desarrollar resistencias mecánicas y fuerzas adhesivas que permiten principalmente la interacción con las armaduras y los agregados.

Las reacciones químicas de estos agregados constituyentes del hormigón pueden afectar a las estructuras de las que éste forma parte. Algunas reacciones de las que se pueden dar en el sí del hormigón no representan ningún tipo de problema, en algunos casos inclusive podrían llegar a ser beneficiosas para el mismo, otras en cambio, como las reacciones expansivas pueden generar un deterioro muy importante en el hormigón y por ende en la estructuras.

Los primeros problemas que se atribuyen a este tipo de fenómenos se presentan en una presa de California, la patología se considera una consecuencia de la interacción entre los áridos y los álcalis del cemento denominando a este fenómeno reacción álcali-árido, Stanton (1940).

En la actualidad, la comunidad científica no habla de un solo tipo de reacción entre los áridos y el cemento. Esta habla de la existencia de áridos potencialmente reactivos a algunos de los componentes de las fases del hormigón de las estructuras y por este motivo se habla de:

- reacciones álcali-sílice (ASR)
- reacciones álcali-carbonato (ACR)
- ataque sulfático

2.2.1.- Reacciones álcali-sílice (ASR)

De las tres reacciones expansivas presentadas la que más atención ha recibido, sin lugar a duda, es la reacción álcali-sílice, que por influencia de los estudios de Stanton y por el hecho de que los estudios que lo siguieron no fueron capaces de determinar la relación existente entre el deterioro de la estructura y el contenido de álcalis del cemento, la reacción se denominó, como ya se ha dicho álcali-agregado. Estudios realizados en años posteriores, Hadley (1964), determinaron que se trataba de una reacción álcali-sílice.

Ciertas rocas de naturaleza silíceas reaccionan con los álcalis del cemento dando lugar a la formación de geles de sílice que, generalmente, tienen una acción osmótica, en presencia de agua, y por absorción de ésta aumentan de volumen provocando importantes presiones disruptivas.

Los minerales y las rocas que tienden a provocar estos fenómenos son los minerales opalinos, ciertas rocas volcánicas con contenido medio o alto en sílice, algunas pizarras y filitas, con elevado contenido en hidrómicas y zeolitas del tipo heulandita, para citar los casos más relevantes.

El esquema general de la reacción es según Plum *et al.* (1958):



Las sílices de las rocas y minerales susceptibles de ser áridos reactivos interaccionan con la sosa, produciendo, en primer lugar, una reacción ácido-base entre los grupos silanol Si-OH y los iones de la solución alcalina después de la neutralización por la unión de la carga negativa formada, reacción (2.1) y figura 2.1

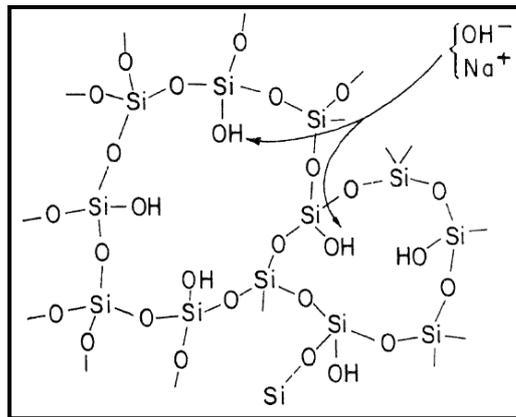
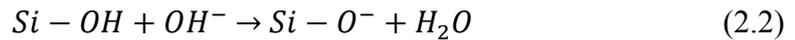


Figura 2.1- Neutralización por NaOH de grupos silanol ácidos (Dent Glasser y Kataoka, 1981).

Posteriormente se produce una segunda reacción consistente en un ataque de puentes siloxanos por iones OH^- , reacción 2.3 y figura 2.2, reacción que entraña una desintegración de la estructura y el paso de la sílice a SiO_2H_2 , Dent Glasser y Kataoka (1981).

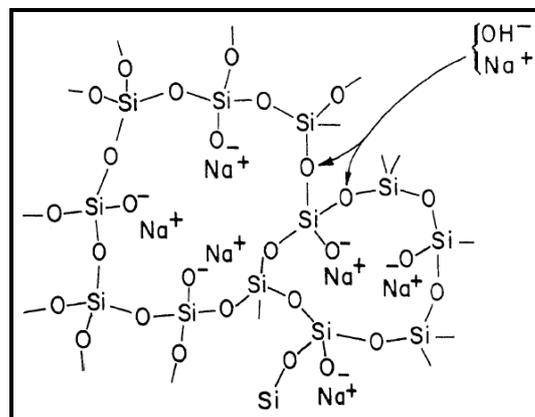
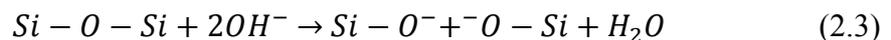


Figura 2.2- Ruptura por NaOH de puentes siloxano (Dent Glasser y Kataoka, 1981).

Ambas reacciones se producen simultáneamente, dando lugar a la formación de un gel de silicato sódico de fuerte carácter expansivo. La virulencia de la expansión dependerá del volumen de concentración del gel, de sus propiedades físicas y de su velocidad de crecimiento. Si la velocidad es lenta, las fuerzas internas se disipan por migración del gel a través del hormigón, mientras que si la velocidad es relativamente alta la expansión generará el deterioro del hormigón.

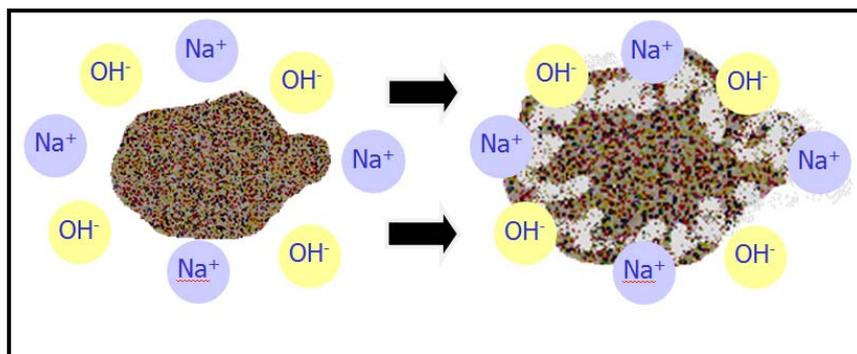


Figura 2.3- Esquema del proceso de expansión por ARS (Garcés et al., 2007)

Para que esta reacción sea una realidad es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, además de agua. La reacción en si no es dañina para el hormigón, aquello que es perjudicial es la consecuente expansión que se produce siempre y cuando haya una cantidad suficiente de sílice i de álcalis, además de una aportación externa de agua, condición, esta última, que se cumple siempre en las presas.

2.2.1.1.- La influencia de los áridos

Los hormigones utilizados en la construcción de grandes estructuras, como son las presas, son para los áridos un hábitat muy distinto al suyo natural, estos al encontrarse con esta nueva realidad reaccionan hasta llegar a un nuevo equilibrio. Es la reactividad del árido quien permite llegar hasta esta nueva situación de estabilidad.

La cantidad de sílice reactiva es fundamental para el desarrollo del proceso expansivo, su acción, pero, depende de la cantidad de álcalis disponibles y de la relación agua/cemento de la mezcla. Aunque no lo pueda parecer, cantidades mínimas, por ejemplo el 1% de árido reactivo, puede llegar a generar expansiones altamente destructivas. Se ha llegado a pensar que las expansiones que padecen los hormigones de las estructuras son directamente proporcionales a la cantidad de árido reactivo presente en la mezcla, es decir a más árido reactivo mayor será el nivel de expansión en el hormigón, sin embargo los estudios realizados hasta la fecha no corroboran esta teoría, más bien todo lo contrario. La experiencia ha demostrado que existe lo que se conoce como el contenido pésimo de agregado reactivo, se denomina pésimo porque es el contenido de árido asociado a la mayor expansión del hormigón.

Se presenta en la figura 2.4 el comportamiento pésimo en un hormigón elaborado con un agregado cuyo componente reactivo era sílice opalina (el 5% en el agregado), el nivel de álcali en la mezcla era 6 kg/m^3 . De la figura puede extraerse que la expansión del hormigón alcanza un máximo cuando el contenido de agregado reactivo es 45% (que corresponde a un contenido de sílice reactiva de 2.25%). Si se incrementa el contenido de

sílice reactiva por encima de este valor la expansión experimenta un descenso progresivo, Hobbs (1988).

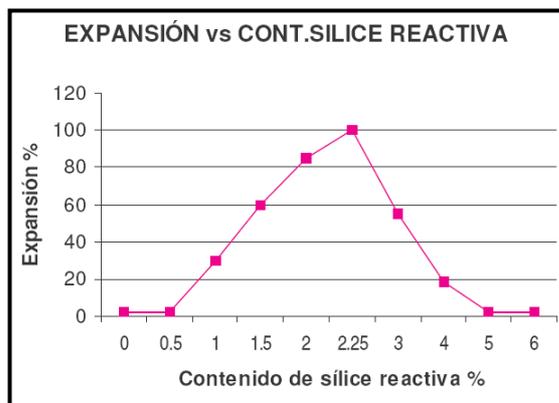


Figura 2.4- Gráfica efecto pésimo

Vista la importancia de los áridos y de su reactividad, en 1958 fueron etiquetados como reactivos una serie de ellos por el *Transportation Reserch Board*. Esa clasificación no era definitiva, pues se han añadido rocas a medida que han sido consideradas como reactivas, este es el caso por ejemplo de: las argilitas, las cuarcitas y los esquitos, además del cuarzo fracturado y el gneis granítico entre otras.

En la Tabla 2.1 se presenta un listado, preparado por CSIR Pretoria, no exhaustivo, de minerales, rocas, y otras sustancias potencialmente reactivas.

Varias de estas rocas reaccionan de manera lenta y su reactividad en consecuencia no fue reconocida hasta que las obras hubieron envejecido, en algunos casos se tuvo que esperar más de 20 años.

Por otra parte cabe mencionar que algunas rocas y minerales no participan en la reacción álcali-sílice pero pueden producir álcalis por deslave, pudiendo hacer reaccionar a los agregados reactivos, Stark y Bhatti (1986).

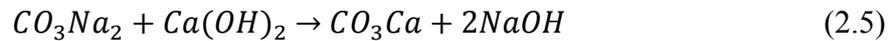
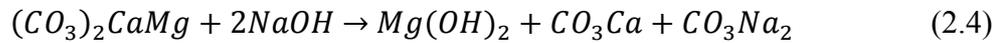
2.2.2.- Reacciones álcali-carbonato (ACR)

Se ha demostrado que ciertas rocas carbonatadas participan en reacciones con los álcalis, en algunos casos estas reacciones provocan expansiones. Las reacciones perjudiciales se asocian con las calizas arcillosas y dolomíticas, Hadley (1964). Estas reacciones se han denominado álcali-carbonato y han sido estudiadas exhaustivamente en Canadá donde fue reconocida por Swenson en 1964. Ciertos agregados de rocas carbonatadas, especialmente dolomíticas, fueron reactivos cuando se utilizaron en estructuras de hormigón en ese país, siendo reactivos los agregados extraídos de la cantera así como las gravas que contienen partículas de la misma formación.

MINERALES	
Ópalo	
Calcedonia	
Tridimita	
Cristobalita	
Cuarzo vitrificado	Criptocristalino, microcristalino
Cuarzo de grano grueso	Intensamente fracturado, granulado y deformado con incrustaciones submicroscópica, de las que la illita es una de las más corrientes.
Sílice volcánica cristalizada	Intermedia y básica
Cuarzo jaspeado	
ROCAS	
Rocas ígneas	
Granitos	Más del 30 % de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más
Granodiorita	
Charnockites	
Piedra Pómez	
Riolitas	
Andesitas	Sílice o sílice intermedia, rica en cristales volcánicos; cristales desvitrificados; tridimita.
Dacitas	
Latitas	
Perlitas	
Obsidianas	
Toba volcánica	
Basaltos	Calcedonia; cristobalita; palagonita; vidrio volcánico básico
Rocas metamórficas	
Gneis	Más del 30 % de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° ó más
Esquistos	
Cuarcitas	Cuarzo deformado como anteriormente; 5 % o más de sílice
Corneanas	Cuarzo deformado como anteriormente; cuarzo microcristalino a Criptocristalino
Filitas	
Argilitas	
Rocas sedimentarias	
Areniscas	Cuarzo deformado como antes; 5 % o más de sílice; ópalo
Grauwacas	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a Criptocristalino
Limos	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a Criptocristalino
Pizarras	
Tillitas	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a Criptocristalino
Sílice	Cuarzo criptocristalino; calcedonia; ópalo
Sílex	
Diatomita	Ópalo; cuarzo criptocristalino
Calizas arcillosas dolomíticas	Dolomita; filosilicatos expuestos por dedolomitización
Dolomías arcillosas cálcicas	
Calcita arcillosa dolomítica con cuarzo	
OTRAS SUSTANCIAS	
Vidrio sintético	Gel de sílice

Tabla 2.1- Listado de minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento (Alaejos y Bermúdez, 2003).

Se ha propuesto más de un mecanismo para explicar la reactividad álcali-carbonato, Hadley en 1964 fue el primero, le siguieron Gillot y Swenson (1969), según los cuales la desdolitización es la reacción del carbonato cálcico y magnésico con una solución alcalina que da como producto la brucita (hidróxido de magnesio) y la regeneración de hidróxido alcalino según las reacciones siguientes:



La brucita puede aparecer bien en la zona de contacto entre los áridos y la pasta, bien en el mismo árido, pudiendo reaccionar con la sílice alrededor del árido y formar un silicato de magnesio.

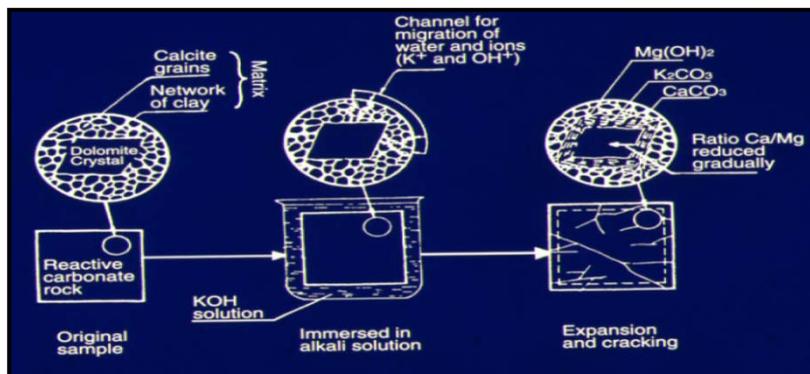


Figura 2.5- Esquema del proceso que da lugar a la expansión (Parra, 2004).

Por otra parte, hay que indicar que la zona porosa que se crea alrededor del árido, por extracción de iones Mg^{2+} debilita la unión árido-pasta, sin que el proceso de desdolitización provoque, en ningún caso, la aparición de geles de sílice exudando las fisuras, lo que representa una significativa diferencia con la reacción álcali-sílice.



Figura 2.6- Brucita con fisuras en microscopio (Garcés et al., 2007)

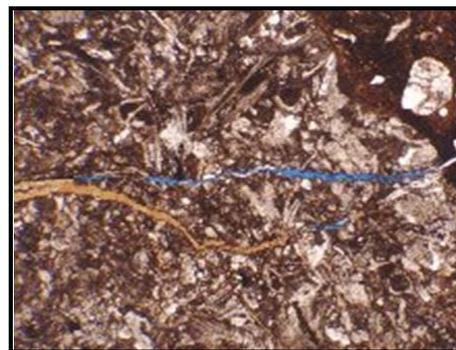


Figura 2.7- Brucita con fisuras en Microscopio (Garcés et al., 2007)

Existen dos mecanismos que pueden ocasionar las reacciones presentadas en los párrafos precedentes, uno directo y uno de indirecto.

En el considerado mecanismo directo, Deng y Tag (1992), la desdolitización produce el aumento de volumen, y la presión de cristalización de la calcita y la brucita es el factor que provoca la expansión y todas sus consecuencias.

En cambio, el mecanismo indirecto, Gillot y Swenson (1969), la fuerza que provoca la expansión se debe a la absorción de agua por las arcillas que forman parte de la matriz de grano fino de los áridos que causan este tipo de reacciones expansivas.

Además de las reacciones álcali carbonato expansivas y perjudiciales existen otro tipo de reacciones donde participan las rocas carbonatadas en relación con los áridos del hormigón. Debido a estos procesos las zonas periféricas de las partículas de agregado que están en contacto con la pasta cementicia desarrollan unos bordes dentro de las partículas, lo que representa una alteración significativa de la pasta que las rodea, Hadley (1964). Estos bordes prominentes que aparecen reciben el nombre de bordes positivos y bordes negativo, según si al ser atacados por áridos aparecen en relieve positivo o negativo. La gran diferencia de estas reacciones álcali-carbonato formadoras de bordes con respecto a las reacciones álcali-carbonato tratadas al inicio de este apartado es que las segundas es muy poco probable que constituyan una reacción perjudicial para el hormigón de las estructuras por sí mismas, Buck y Dolch (1976).

2.2.3.- Factores externos influyentes en ASR y ACR

Existen una serie de factores: contenido de álcalis de la fase intersticial del hormigón, la presencia de humedad, el tiempo y la temperatura, a considerar en el caso de la degradación de una estructura de hormigón por reacciones álcali-árido.

Con respecto al primero de estos factores, contenido de álcalis de la fase intersticial del hormigón, hay que dejar constancia que deben ser estos los álcalis a considerar, y no únicamente los álcalis del cemento. Esta diferencia en la cuantificación del contenido total de álcalis nos puede llevar a un grave error, pues conllevaría al desprecio de una cantidad importante de los mismos. Los álcalis de la fase intersticial del hormigón, que son los que realmente pueden reaccionar, no provienen de manera exclusiva del cemento, sino que pueden provenir de los áridos, de las adiciones, en el caso que existan, e inclusive del agua del amasado, por lo que el límite máximo de álcalis en el cemento, establecido por las normas internacionales, que en general, oscila alrededor del 0,6 % de Na_2O equivalente, no debe considerarse como excluyente de la posible reacción álcali-árido, por lo que siempre se deberán tener en cuenta otros factores, siendo el más relevante la composición mineralógica de los áridos

La reacción álcali-árido puede llegar a considerarse como un fenómeno prácticamente inofensivo si no existe penetración de agua por las zonas de contacto entre árido y la pasta de cemento. El problema se presenta cuando si por alguna causa se da la presencia del agua en el seno del hormigón, pues la reacción puede desencadenarse hasta llegar a destruir por completo la estructura ya sea en pocos meses o en varias decenas de años.

Hay que señalar igualmente que la relación agua/cemento puede jugar un papel nada despreciable en el desarrollo de la reacción estudiada, ya que si la cantidad de agua en el seno del hormigón es suficiente puede producirse la formación de productos expansivos sin necesidad de aporte exterior.

Otras variables a considerar son la humedad relativa, con unos valores críticos que se sitúan, para la gran mayoría de los autores, entre el 80 y el 85 %, y el aumento de temperatura, pues ambas aceleran las reacciones químicas.

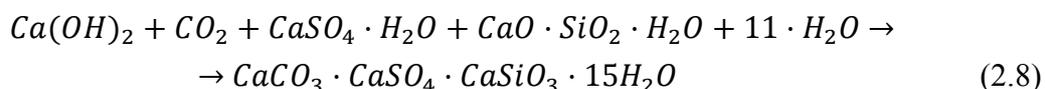
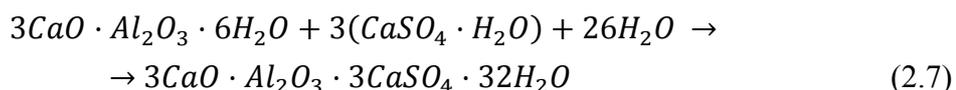
2.2.4.- Ataque sulfático

De entre todos los agentes agresivos del hormigón, los sulfatos son, sin duda, uno de los más importantes, ya sea por la frecuencia con que se presenta su ataque, ya sea por las consecuencias que de él se pueden derivar.

El ataque sulfático es una reacción entre la solución agresora y los componentes del cemento formando productos secundarios, que se manifiesta con una marcada expansión del hormigón que lo padece. Si el hormigón está en contacto con agua éste tiende a expandirse del orden de un centenar de micras por metro en el transcurso de unos cantos años, Callepari (1980). La expansión que se manifiesta en el hormigón es un fenómeno exactamente opuesto al fenómeno de retracción que podría padecer el mismo hormigón, pero con una variación volumétrica mucho mayor, lo que contribuye a generar unas tensiones internas que propician la degradación de la estructura.

En el caso que nos ocupa, la expansión que genera la degradación en el hormigón tiene algunas particularidades, además de llegar a valores altos, y por tanto ser muy agresiva, se trata de una expansión poco homogénea en toda la masa de hormigón, pues se manifiesta sobre todo en sus zonas más corticales.

Las reacciones que se presentan a continuación son las encargadas de la destrucción del hormigón. La primera conlleva a la formación de yeso, la segunda conlleva a la formación de etringita y la tercera provoca la formación de thaumasita.



El $Ca(OH)_2$, que siempre se encuentra presente en el hormigón al ser un producto de la reacción entre el agua del amasado y los silicatos de calcio del cemento, se transforma en el yeso más voluminoso posible, $CaSO_4 \cdot H_2O$ según la reacción (2.6). Aún es mayor, pero, el aumento de volumen que se experimenta en la reacción (2.7) cuando un aluminato de calcio se transforma en etringita.

Los aluminatos presentes en el seno del hormigón provienen fundamentalmente del aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$ o dicho de otra manera C_3A) y del ferro-aluminato tricálcico ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ o más brevemente C_4AF) del cemento.

La reacción (2.7) provoca, como se ha comentado anteriormente, un aumento de volumen mayor al que representa la reacción (2.6) y el C_3A contribuye de manera más determinante en la formación de etringita que el C_4AF , lo que conlleva a decir que el C_3A del cemento utilizado es un parámetro esencial en el desarrollo de las reacciones expansivas de las estructuras de hormigón. En la figura 2.8, realizada con datos del A.S.T.M. se puede ver cómo influye el contenido de C_3A que tenga un cemento en el porcentaje de expansión que puede presentar un hormigón a los 28 días y sobretodo en 1 año.

Si se dan unas condiciones ambientales determinadas: climas fríos ($0-5^{\circ}\text{C}$), húmedos (humedad relativa $> 95\%$) y ricos en dióxido de carbono (CO_2), el yeso que se forma en la reacción (2.6) reacciona con la cal, el dióxido de carbono y el silicatos para formar thaumasita, mediante la reacción (2.8), devastador para el hormigón. La formación de thaumasita es más preocupante que la formación de etringita, pues provoca que el hormigón se convierta en un material totalmente inconsistente. Por fortuna, pero, es una reacción poco usual.

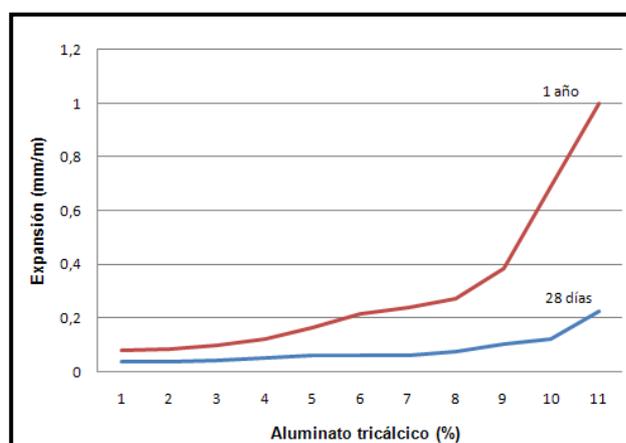


Figura 2.8- Influencia del contenido de C_3A en el cemento sobre las expansiones causadas por el ataque sulfático.

En lo que concierne a la etringita, es de fundamental importancia para el deterioro o degradado del hormigón que el producto que se forme sea morfológicamente en forma de cristales poco recrecidos, al ser este tipo de etringita la única capaz de absorber agua y así provocar la expansión del hormigón.

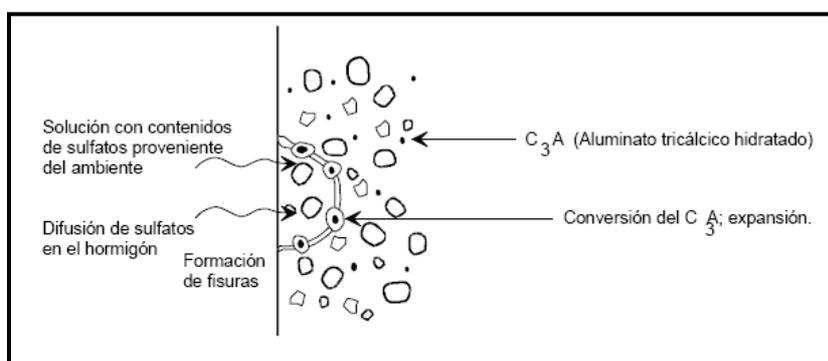


Figura 2.9- Efectos padecidos por el hormigón en medios sulfatados.

Otro de los ataques químicos, provocado por derivados del azufre, que puede padecer el hormigón es el causado por los sulfuros que con las debidas trasformaciones pueden derivar en ácido sulfúrico. Esta trasformación suele presentarse como consecuencia de la oxidación de los sulfuros de hierro, que generalmente viene precedida de una coloración marrón en el hormigón.

Los sulfuros de hierro se encuentran normalmente en los agregados en forma de pirita, pirrotina y marcasita. La primera, la pirita, se encuentra en todo tipo de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, es de coloración amarilla y forma generalmente cristales cúbicos. La pirrotina es la menos común de las tres y se encuentra en rocas ígneas y metamórficas. La marcasita, en cambio, se encuentra en rocas sedimentarias. Esta tercera piedra se oxida fácilmente con liberación de ácido sulfúrico y formación de óxidos e hidróxidos de hierro.

A continuación se presentan uno de los mecanismos de degradación que podrían desarrollarse cuando se disponga de pirrotina. Semejante sería para la pirita, ambas son inestables y se oxidan para dar ácido sulfúrico.

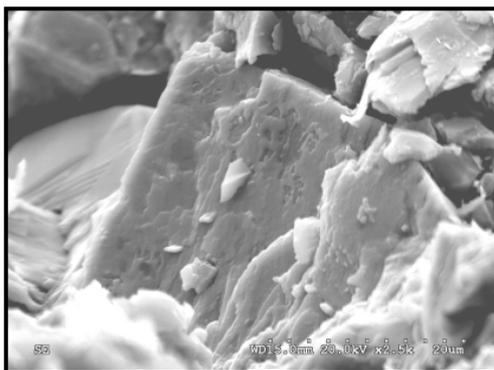
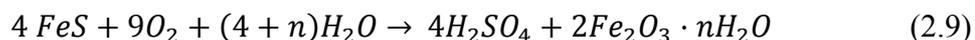
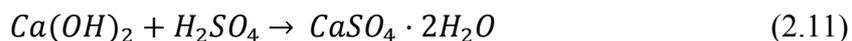
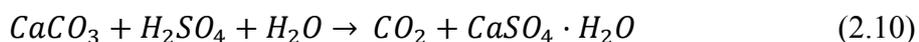


Figura 2.10- Imagen de los sulfuros de hierro en el árido (Araújo et al., 2008a).

El ácido sulfúrico reacciona con el $CaCO_3$, reacción (2.10), dándose como resultado la formación de yeso. Este ácido sulfúrico también reacciona con los productos de hidratación del cemento, reacción (2.11).

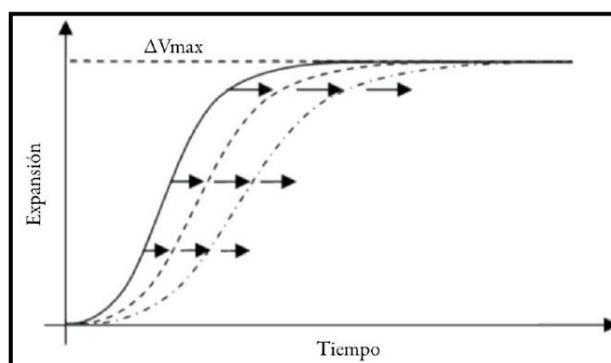


Todos los productos derivados, sea en primera instancia o en segunda, de la oxidación de los sulfuros de hierro tienen volúmenes superiores a los de los compuestos originarios, lo que lleva a aumentar la tensión interna del hormigón con todas las consecuencias que esto conlleva.

Se estima que los incrementos de volumen debidos a la reacción de oxidación de los sulfuros de hierro son del orden de $6,06 \text{ cm}^4/\text{mol}$, Casanova et al. (1996). Por otro

lado, el mismo texto, estima que en el ataque sulfático el incremento de volumen puede llegar a ser de 172,19 cm³/mol.

Se presenta, en el estudio antes citado, un modelo numérico que permite evaluar la expansión máxima debido a reacciones primarias y secundarias además de la velocidad con que el fenómeno expansivo se manifiesta, figura 2.11. Las curvas representan el incremento de acuerdo con el tamaño de los granos, dado que la cinética de las reacciones es inversamente proporcional al diámetro de los áridos.



2.11- Evolución del fenómeno expansivo debido al ataque sulfático (Araújo et al., 2008a).

Es importante resaltar que la expansión, según la misma figura 2.11, se puede dividir en tres etapas diversas, donde la velocidad de la expansión es muy diversa. En la primera de ellas la expansión se da lentamente, hasta llegar a una segunda fase donde el incremento de volumen del hormigón se realiza a gran velocidad, finalmente se llega a una tercera fase, donde existe una desaceleración de los incrementos de volumen, llegando a un instante en que cesa la expansión.

Capítulo 3

La instrumentación de la presa

3.1.- INTRODUCCIÓN

El objetivo esencial de la instrumentación de una presa, y de su inspección integrada, es esencialmente garantizar la seguridad de la obra. No se trata, únicamente, de intervenir en el último momento antes de que se presente una catástrofe. El proceder adecuado responde a un seguimiento constante de la presa para poder definir, de manera óptima, las intervenciones puntuales destinadas a garantizar su máximo rendimiento así como alargar tanto como sea posible su vida útil.

Una instrumentación ideal debe tener en consideración una serie de aspectos como son: tipo de presa, edad de la misma, criterios de proyecto y construcción..., para elaborar un sistema de auscultación eficiente, y así, permitir un análisis e interpretación de los datos obtenidos para alcanzar el fin previsto.

Este capítulo de auscultación tratará con especial atención los sistemas instrumentales dedicados a detectar las presas que padecen expansiones de hormigón, pero así inclusive, primero se quiere hacer una reflexión genérica sobre la auscultación y la seguridad, dos conceptos que van estrechamente relacionados. De hecho podemos decir que la auscultación nace de la necesidad de conocer el estado de las presas y con ello de prever acontecimientos no deseados y así poder intentar evitarlos.

3.2.- LA IMPORTANCIA DE LA INSTRUMENTACIÓN

Si observamos la evolución en la construcción de las presas nos daremos cuenta que se ha experimentado una mejora técnica sustancial, pero al mismo tiempo debemos ser conscientes que estas últimas presas han sido construidas en sitios complicados, poco propicios geológicamente para ser sede de este tipo de obra civil, pues los mejores fueron ya utilizados en otros tiempos. Hoy en consecuencia el proyectista, primero, y el ingeniero de explotación, después, se encuentran en un entorno incierto, y precisamente de ahí la

importancia de la instrumentación al ser una de las herramientas que pueden ayudar a solventar los problemas que se pueden presentar. Aún así, en los últimos 10 años, los avances más destacables en sistemas de auscultación de presas sólo se han hecho en el campo de la automatización, mientras que la tecnología de los sensores para el control de las variables como temperatura, movimientos, presiones, deformaciones y filtraciones que se instalaron en las presas no han cambiado significativamente.

Tener una presa instrumentada debe permitir, a quienes interpretan los datos, observar que alguna cosa que sucede en la presa no es normal. Donde se ha producido, o se está produciendo, la anomalía así como de qué tipo de fenómeno se trata y el por qué de su aparición pueden requerir un estudio e interpretación más profundos.

La auscultación por instrumentación puede detectar únicamente una serie de fenómenos indicativos de que alguna cosa está sucediendo, pero existen otras evidencias de fenómenos anómalos que solo son detectados por inspección visual, el sistema más simple y uno de los más eficaces.

Mediante la inspección visual se puede realizar, además, lo que se considera una auscultación de tipo distribuida, es decir, obtener información continua sobre la presa en todas sus zonas visibles, especialmente paramentos y galerías. Sin embargo, la información obtenida es sobre todo cualitativa. Existen otras tecnologías de auscultación distribuida, siendo el Laser Scanning, presentado en el final de este capítulo, su máximo exponente.

Todo este proceso de auscultación y análisis responde a la voluntad de detectar un problema antes de que se produzca, porque una vez producido de poco sirve que los datos de la auscultación revelen que una falla se ha producido.

Gracias a una buena auscultación una patología como las reacciones expansivas, que se desarrollan y manifiestan tan solo después de una cierto periodo de puesta en obra de la presa, se puede empezar a combatir de manera eficiente gracias a no haber sido ignorado durante demasiado tiempo.

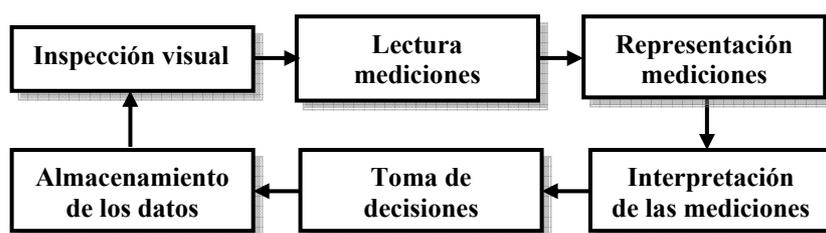


Figura 3.1– Organigrama del ciclo de de análisis e interpretación del comportamiento de una estructura general

Por desgracia no todas las presas disponen de óptimos sistemas para realizar este tipo de trabajos. Las presas construidas en todo el mundo pueden clasificarse en 8 categorías según los sistemas de que disponen, tabla 3.1, Lombardi (2006).

Clase	Tipo de datos disponibles
0	Ningún dato disponible
1	Sólo inspección visuales
2	Sólo lectura y archivación de datos
3	Examen intuitivo de plausibilidad
4	Simple representación gráfica de los datos
5	Análisis estadística de datos
6	Correlación estadística
7	Comparación estadística con un modelo determinístico

Tabla 3.1- Clase de presas según instrumentación (Lombardi, 2006).

El mismo texto muestra la preocupación por la falta de instrumentación de alguna presa, dejando claro, eso sí, que en Europa casi todas las importantes si disponen de sistemas de instrumentación, Lombardi remarca, pero, que estos sistemas no siempre son utilizados de manera óptima.

España no es una excepción dentro de Europa. Desde hace bastantes años se están desarrollando métodos y técnicas que han permitido conocer como se encuentran nuestras presas.

3.3.- LA INSTRUMENTACIÓN DE PRESAS.

Se entiende por instrumentación y control de presas un proceso continuo, con regularidad en la obtención de datos, para permitir un análisis rápido de los mismos por el personal responsable de la presa para obtener unas conclusiones objetivas.

Cada presa es única, y con ella todo aquello que la rodea, pero teniendo en cuenta este hecho se pueden definir una serie de pautas que ayuden a obtener unos buenos datos de auscultación:

- Definir un proyecto de auscultación que incluya los parámetros a medir, la distribución de aparatos, la precisión y la sensibilidad de las medidas. La estructura y la cimentación son una unidad y como tal deben controlarse.
- La distribución de los aparatos se realiza teniendo en cuenta que cada uno de ellos debe contribuir a interpretar el comportamiento de la presa, sin por ello recargar la presa de instrumentos que faciliten datos redundantes.
- Los datos deben ser tomados según programas establecidos y variables consideradas en función de las distintas fases de la obra (construcción, puesta en carga y posterior explotación) para asegurar en cada una de ellas la estabilidad de la presa.
- Los datos contabilizados deben permitir un análisis e interpretación armónica de todo el conjunto.

Para poder obtener unos resultados óptimos, y por lo expuesto anteriormente, hay que ser conscientes que no basta con un sistema tecnológico puntero, pues este puede

influir en la sensibilidad de las mediciones, en su frecuencia..., pero es incapaz por si solo de extraer las tan necesarias conclusiones, por esto es esencial contar con una serie de técnicos competentes y experimentados capaces de leer la información que les transmiten los aparatos y asumir responsabilidades en momentos difíciles, teniendo en cuenta que no se debe emitir un juicio, sea favorable o desfavorable, sobre el comportamiento de la presa sin antes haber hecho una inspección y análisis detallado de la situación anómala.

Como ya se ha enunciado la construcción, puesta en carga y posterior explotación incluso siendo fases distintas en la vida de la presa deben ser estudiadas con la misma atención y por encontrarse una a continuación de la otra los resultados obtenidos en una fase son relevantes para interpretar aquellos que se presentan en las siguientes y por esto la presa y sus fases constituyen una única unidad y así debe ser estudiada.

Las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 presentan de modo sintético las magnitudes básicas que deberían medirse en una presa cualquiera de hormigón y los instrumentos que podrían usarse para tal tarea en las distintas fases de la vida de la presa. En estas tablas G= presa gravedad, A= presa arco, C= presa de contrafuertes, x=magnitud a medir y 0= magnitud que no se mide.

Magnitud a medir en el ambiente	Construcción	Primer llenado	Ejercicio	Instrumentos
Temperatura del aire	x	x	x	Termómetros
Precipitaciones	x	x	x	Pluviómetros
Presión atmosférica	x	x	x	Barómetro
Humedad del aire	x	x	x	Higrómetro
Temperatura del agua	0	x	x	Termómetros

Tabla 3.2- Magnitudes a medir en ambiente

Magnitud a medir en el cuerpo de la presa	Construcción			Primer llenado			Ejercicio			Instrumentos
	G	A	C	G	A	C	G	A	C	
Movimientos horizontales	0	0	0	x	x	x	x	x	x	Triangulación, colimación y péndulos
Movimientos verticales	x	x	0	x	x	x	x	x	x	Nivelación topográfica
Apertura de juntas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros, defórmetros
Apertura de fisuras	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros, dofórmetros
Temperatura hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Termómetros
Deformación hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros
Solicitación hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Tensiómetros

Tabla 3.3- Magnitudes a medir en el cuerpo de la presa

Magnitud a medir en la cimentación	Construcción			Primer llenado			Ejercicio			Instrumentos
	G	A	C	G	A	C	G	A	C	
Movimientos horizontales	0	0	0	x	x	x	x	x	x	Péndulos
Movimientos verticales	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Nivelación topográfica y extensómetros
Deformaciones de la roca	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros
Módulo elástico	x	x	x	x	x	x	0	0	0	Velocidad sísmica
Solicitación	x	x	x	x	x	x	0	0	0	Tensiómetros
Subpresión	0	0	0	x	x	x	x	x	x	Piezómetros

Tabla 3.4- Magnitudes a medir en la cimentación de la presa

3.4.- LOS INSTRUMENTOS Y LAS MAGNITUDES CONTROLADAS EN PRESAS DE HORMIGÓN SUSCEPTIBLES DE PADECER EXPANSIONES

3.4.1.-Temperatura

- Incrementos térmicos y temperaturas máximas alcanzadas durante el proceso de fraguado
- Gradientes térmicos en sentido horizontal y en sentido vertical, posibles causantes de alterar el sellado de las juntas de hormigonado.
- Evolución térmica de los bloques que forman juntas para fijar las fechas más idóneas para inyecciones.
- Red de isotermas en algún bloque de acuerdo con la orientación del eje de la presa.

Para realizar este tipo de medidas históricamente se han usado dos tipos de termómetros: termopares y de resistencia de platino, ambos con lectura digital y fácilmente automatizados.

3.4.2.-Comportamiento de la juntas de contracción

- Conocer los desplazamientos entre bloques relativos mientras son independientes.
- Obtener información sobre el estado de apertura de las juntas hasta la ejecución de las inyecciones
- Controlar las operaciones de lavado e inyección de estas juntas para conseguir la unidad estructural
- Aportar elementos de juicio sobre la necesidad o conveniencia de repetir alguna inyección con el paso del tiempo.
- Conocer, durante la fase de construcción, los asientos diferenciales que pueda padecer la cimentación por cierre de diaclasas, por distinta deformabilidad...

Para realizar este tipo de tareas vienen siendo utilizados dos tipos de aparatos, los defómetros para control de juntas en superficie y el medidor de juntas electrónico. El primero suele ser utilizado en galerías o en paramentos y el segundo en la parte interior de los bloques.



Figura 3.2- Termómetro termopar digital



Figura 3.3- Defómetro usado para control de juntas

3.4.3.- Comportamiento mecánico del hormigón de la presa

- Estado de esfuerzo en la estructura y su evolución en el tiempo
- Red de isostáticas

Los aparatos utilizados para tal menester son los extensómetros de cuerda vibrante de lectura digital y fácilmente automatizables.

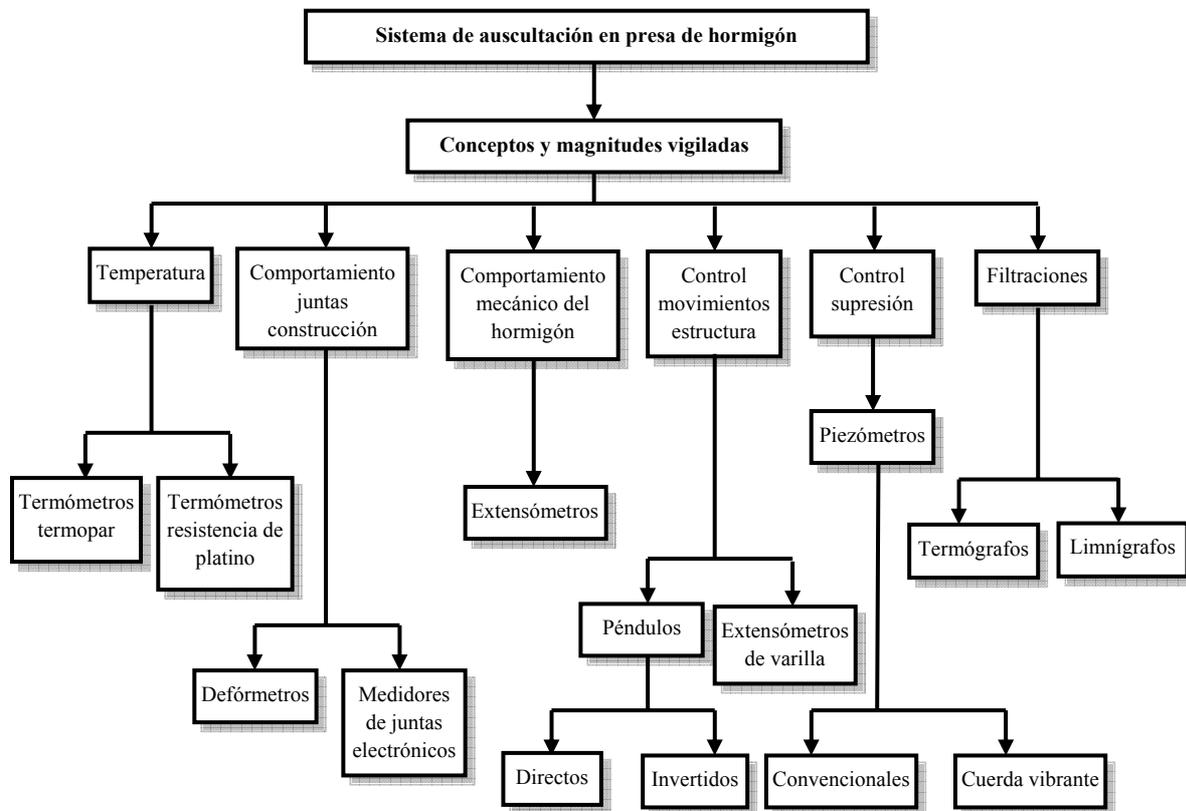


Figura 3.4- Sistema de auscultación teórico de una presa de hormigón

3.4.4.- Control de movimiento de la estructura y su cimentación

- Desplazamientos horizontales absolutos
- Desplazamientos verticales absolutos
- Deformabilidad de la cimentación en las zonas más cargadas a embalse lleno, detectando la forma real de trabajo de la cimentación.
- Influencia de las variaciones de las presiones intersticiales de la roca en los desplazamientos medidos en la estructura y su cimentación.
- Repetibilidad de los movimientos para condiciones semejantes.

Los péndulos directos e invertidos y los extensómetros de varillas son los que se encargan de realizar tales tareas. La información que aporta este tipo de aparatos es muy local, por lo que si se quieren conocer valores globales que puedan referirse a gran parte de la presa es necesario instalar un gran número de dispositivos



Figura 3.5- Péndulo directo de la presa de la Baells



Figura 3.6- Péndulo indirecto de la presa de la Baells

Para realizar esta labor, y para evitar llenar la presa de instrumentos se utilizan las técnicas geodésicas de nivelación y colimación, registrando la posición de una serie de puntos y analizando a posteriori su evolución espacial. Este tipo de medidas se pueden realizar sólo en coronación, o extenderlas también a las galerías horizontales, con lo que la información obtenida aún es mayor.

3.4.5.- Control de subpresión

- Conocer la eficacia de la red de drenajes
- Ley de subpresiones a lo largo de la base de los bloques

Son usados para tal menester los piezómetros, si bien estos pueden ser de dos clases, o bien convencionales o de cuerda vibrante.

3.4.6.- Filtraciones

- Caudal y evolución en el tiempo
- Posible arrastre de material fino
- Rotura de pantallas en alguna zona

Estas magnitudes van estrechamente relacionadas con las variaciones del nivel del embalse. Pueden registrarse en termógrafos apropiados o limnigrafos.

3.5.- FRECUENCIA DE LECTURA

Una vez instrumentalizada la presa, y conocidos los instrumentos y las magnitudes a registrar, es de capital importancia establecer la frecuencia de las mediciones, pues un defecto de ellas puede inducir a errores, y un exceso puede representar un gasto económico innecesario.

La frecuencia de lectura de cada instrumento tiene que adaptarse a la naturaleza de la magnitud registrada, por lo tanto un número X de magnitudes a registrar puede significar

X frecuencias distintas. Se debe escoger un intervalo de tiempo entre lecturas que impida que entre lectura y lectura suceda alguna cosa potencialmente peligrosa. Con lo expuesto se entiende que el objetivo es poder realizar una base de datos con las mediciones realizadas para poder desarrollar tres actuaciones básicas: representación, interpretación y toma de decisiones.

3.6.- REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La forma de representación más usual, y más lógica es la cronológica. Una auscultación sin representación gráfica de los datos sirve de muy poco, pero a su vez, también es cierto que una representación sin interpretación de resultados carece de significado.

Uno de los peores errores que pueden cometer los responsables del análisis de los datos de auscultación es despreciar la información de que disponen. Es intolerable que se haga una lectura superflua a los datos y que debido a eso se realice una valoración sin previa reflexión, pues las consecuencias pueden ser devastadoras.

La experiencia enseña que solo un sistema MIC (Modelo Interpretativo Combiando) puede dar una contestación fidedigna a los interrogantes que surgen a medida que se analizan los datos.

Un sistema combinado consiente de manera simultánea interpretar los resultados de distintos aparatos, además permite verificar si lo que sucede es un problema o bien existe algún sistema de medición que padece alguna disfunción y por tanto debe ser debidamente ajustado.

Uno de los ejemplos más significativos de la importancia de una buena interpretación lo encontramos en la presa de Isola, Suiza. Esta presa de arcos múltiples manifestaba unas deformaciones no reversibles hacia aguas abajo. El erróneo modelo matemático utilizado informaba de unos saltos de las deformaciones hacia aguas abajo en los años 1987, 1990, 1994 y 2000, figura 3.8.

Con el tiempo se pudo detectar que se trataba de una deformación continua, no a saltos, debida a la expansión del hormigón, figura 3.9, que quedaba enmascarada por los ciclos anuales que se dan en una presa en explotación. Si el método utilizado para la auscultación hubiera sido el correcto se hubiera podido empezar a solucionar el verdadero problema 10 años antes.

El problema de la presa de Isola no es nuevo, de hecho, su confirmación se encuentra en unos movimientos que se dan desde 1965, acelerados, eso sí, en los últimos años, lo que permitió su detección, pues se le prestó la atención que anteriormente se le había negado.

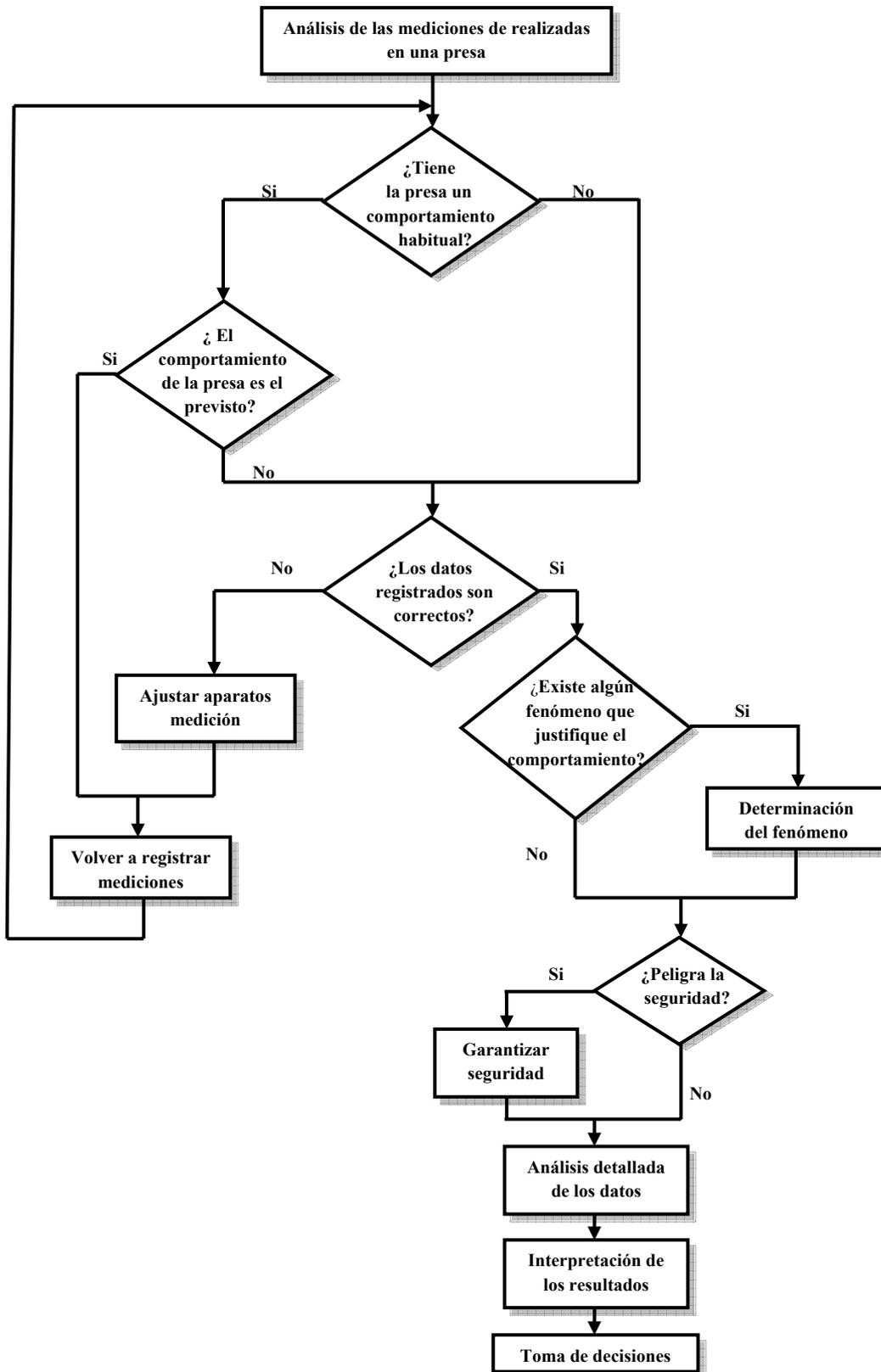


Figura 3.7- Esquema de análisis de los datos obtenidos de la instrumentación

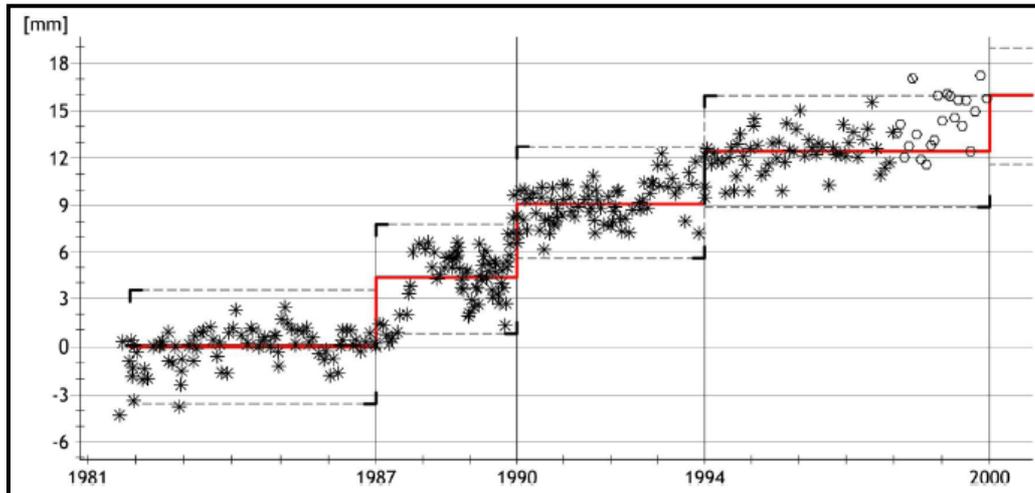


Figura 3.8– Interpretación errónea de las deformaciones en Isola, (Lombardi, 2006).

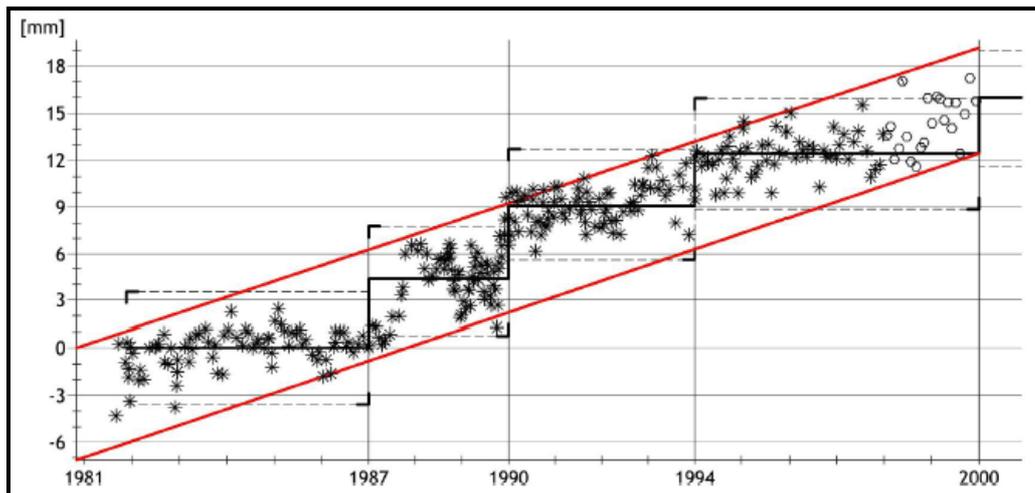


Figura 3.9– Interpretación correcta de los movimientos que se dieron en la presa de Isola debidos a la reacción álcali-silicato, (Lombardi, 2006).

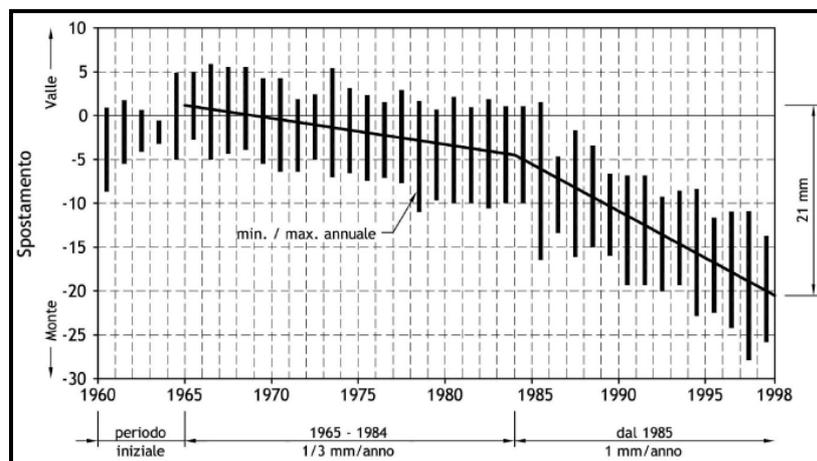


Figura 3.10– Movimientos totales registrados en la presa de Isola, (Lombardi, 2006).

3.7.- UNA NUEVA GENERACIÓN INSTRUMENTACIÓN

Es sabido por todos que las tecnologías avanzan a gran velocidad. Todos los sistemas usados para instrumentar una presa sufren revisiones y modificaciones realizadas con el único objetivo de mejorar sus prestaciones. Se pretende presentar a continuación, de forma breve y resumida algunas metodologías de instrumentación de presas que se podrían considerar de última generación.

Los sistemas presentados a continuación han sido validados por expertos, mediante una comparativa con los métodos tradicionales usados para idénticos fines, con la intención de asegurar su eficiencia antes de ser implementados de manera definitiva en las presas.

3.7.1.- Estación topográfica total automatizada

El propósito de este apartado es identificar las posibles ventajas y limitaciones de la estación total topográfica para el control y la vigilancia de las presas.

La estación total permite la detección de cambios en el plano vertical y en el plano horizontal de los puntos estudiados de la presa. Su utilización permite realizar el seguimiento de un número "ilimitado" de los puntos con el único vínculo de su visibilidad a la estación. Para cada punto de la estación de medición topográfica devuelve la posición del punto expresado en coordenadas cartesianas (x, y, z).

Los sistemas utilizados para este tipo de trabajos son los de gamma más alta entre los existentes en los catálogos de los fabricantes, diferenciándose de los demás por el sistema de búsqueda y registro de los puntos.

Estos instrumentos están equipados con un motor que permite el movimiento en el plano horizontal y vertical, y provistos con un sistema de señalización automático que permite la observación, a intervalos de tiempo regulares, de una serie de puntos de acuerdo con una secuencia establecida de antemano.



Figura 3.11– Estación total automatizada

La estación total topográfica automatizada debe estar instalada en un pilar de hormigón, a través de la utilización de una placa especial de anclaje para el centro. Se sugiere instalar la sede en un área protegida.

Los parámetros característicos de estas estaciones totales son los mismos que los presentados por los instrumentos topográficos tradicionales, con respecto a la exactitud instrumental e incertidumbres relativas a la metodología de medición.

- Incertidumbre instrumental proporcionada por el fabricante
- La incertidumbre relacionada con la metodología de medición que se deriva de una serie de factores que afectan a las condiciones externas tales como la visibilidad, la iluminación, turbulencias... presentes en el momento de la medición.
- Incertidumbre debido a factores meteorológicos (temperatura, presión y humedad a lo largo del recorrido del laser óptico) para los cuales se pueden introducir las correcciones pertinentes.

Magnitud	Incertidumbre fija	Incertidumbre variable
Distancia	1mm	1 ppm
Angulo Azimut	1,5 cc	
Angulo Zenit	1,5 cc	

Tabla 3.5– Típica incertidumbre instrumental proporcionada por el fabricante

3.7.1.1- Principales ventajas de la estación topográfica total automatizada

La información que se obtiene del trabajo topográfico consiente determinar con suficiente precisión los movimientos plano-altimétricos de los puntos registrados sea por movimientos en la propia presa, sea por deslizamientos de las laderas.

Existe un control de movimientos continuo, cuando la estación topográfica está conectada a un sistema de control automático.

3.7.1.2- Principales inconvenientes de la estación topográfica total automatizada

Los límites de uso de las estaciones totales automatizadas y sus incertidumbres de medición son los mismos que los proporcionados por instrumentos topográficos tradicionales. La distancia límite para el control de movimientos en estructuras de hormigón es de algunos pocos metros.

Este sistema necesita disponer de una red de puntos fijos que trabajen como base de referencia para poder realizar los cálculos de los errores y así determinar los valores a implementar para su posterior compensación.

3.7.2.- Laser Scanning

El Laser Scanning representa un nuevo y moderno sistema de digitalización y modelación de elementos del territorio sea cual sea su forma o tamaño, permitiendo un análisis de los mismos de forma distribuida. La digitalización se realiza de forma discreta mediante la registración de la posición de una serie de puntos, normalmente más de una decena de millones, y permite como función básica, encontrar eventuales movimientos de los elementos de una presa.

La registración de los puntos se realiza mediante la medición de distancias con ondas electromagnéticas, con el método conocido como LIDAR (light detection and

renging). El principio fundamental de esta técnica es cálculo del tiempo que necesita un impulso eléctrico para recorrer la distancia que separa el aparato emisor del receptor más el tiempo que necesita el impulso para volver al punto de emisión.

Los Laser Scannig se pueden dividir en dos tipologías, distanciómetros y trianguladores, según el principio usado para realizar las mediciones de los tiempos y en consecuencias de las distancias que separan el emisor de impulsos del punto medido.

Los distanciómetros realizan la medición de la posición tridimensional del punto en coordenadas esféricas, lo que significa que para cada punto relevado hay que realizar tres medidas, un ángulo horizontal, uno vertical y una distancia inclinada, por lo que a veces los instrumentos utilizados para este tipo de trabajos se consideran estaciones totales de elevada automatización.

Los trianguladores, en cambio, utilizan la técnica de la intersección en adelante, lo que significa que para la determinación de la posición de un punto hay que medir una distancia, el ángulo entre rayo emitido y la base del instrumento así como el ángulo que existe entre el rayo reflejo y la base. Este sistema permite realizar unas medidas de elevadísima precisión.

Si se hace un análisis a gran escala se pueden presentar los siguientes beneficios aportados por este nuevo sistema tecnológico de determinación de puntos: tiempos de trabajo reducidos, elevada densidad de puntos medidos, inmediata disponibilidad de los datos, elevada repetitividad de las medidas. También, pero, aparecen algunas contraprestaciones: prestaciones reducidas en caso de lluvia o nieve, la intensidad del señal de retorno depende en exceso del material relevado, la adquisición de la información es secuencial.

Capítulo 4

Sintomatología y diagnóstico de las reacciones expansivas en presas

4.1.- INTRODUCCIÓN

Toda patología que se presente en una estructura debe ser estudiada con detalle para poder plantear una posible solución al problema que revela la presencia de la anomalía detectada.

El estudio debe encaminarse a determinar la patología mediante la identificación de sus síntomas más comunes, unos síntomas que tendencialmente suelen repetirse en las estructuras que padecen el mismo tipo de problema. El conocer la expresión de la patología permite realizar un diagnóstico certero, que debe, forzosamente representar el punto de partida del paso sucesivo: la intervención correctora.

Para poder afrontar con más garantías los problemas derivados de las reacciones expansivas en presas de hormigón se presentan en este capítulo los principales síntomas y una serie de pautas para realizar un diagnóstico óptimo.

4.2.- SINTOMATOLOGÍA

Las presas que padecen reacciones expansivas pueden verse afectadas, como se ha presentado ya en este texto, por tres reacciones químicas distintas, esto en principio debería significar que la sintomatología fuese diversa para cada una de ellas. Lo cierto es que hay ciertas particularidades en los síntomas que distinguen un reacción de las otras, pero al generar las tres reacciones una misma consecuencia, expansión del hormigón afectado, aparecen gran cantidad de síntomas comunes, que son signo inequívoco de expansión, si bien, no sirven para dirimir de que tipo.

A continuación se hace una enumeración de los principales problemas que se generan en las presas por este tipo de reacciones según ICOLD (1991):

- Pérdida de resistencia por microfisuración interna.
- Fisuración superficial como consecuencia de una expansión no uniforme.
- Aumento de la permeabilidad y el consiguiente aumento de las filtraciones.
- Variación de las dimensiones debido a las expansiones.
- Transferencia de cargas en los elementos estructurales adyacentes.
- Problemas con los elementos móviles.
- Presencia de productos de la reacción.

No es trivial la detección de este tipo de problemas, los responsables de la presa deben basarse en dos herramientas básicas para poder percibirlos: las inspecciones visuales, fundamentales para detectar los síntomas directos, y los datos registrados por los distintos sistemas de auscultación, válidos para la detección de síntomas indirectos.

Es importante recalcar también la influencia que tiene en la sintomatología el tipo de presa que es objeto de análisis, dependiendo de la tipología estudiada, se desarrolla en mayor medida un tipo de deterioro u otro con sus consecuentes características.

La fisuración y la presencia de productos de la reacción, sean geles o materiales de oxidación, son síntomas directos de una reacción expansiva, mientras que la aparición de movimientos remanentes que se pueden detectar mediante la auscultación, con péndulos o con mediciones topográficas, así como la variación de los datos registrados de las filtraciones, consecuencia de la fisuración o de un aumento de la permeabilidad, por poner algunos ejemplos, son síntomas indirectos de la misma patología.

4.2.1.-Fisuración

Los signos directos más evidentes de la existencia de expansión en el hormigón son, como se ha dicho anteriormente, la fisuración y los productos surgidos de la propia reacción expansiva, siendo pero la fisuración el más frecuente y evidente.

Se debe, antes de tomar ninguna decisión, o hacer ninguna conjetura, revisar los planos, especificaciones y registros de construcción y mantenimiento, además es necesario visualizar toda la presa en su conjunto. Pequeños detalles que puedan aparecer en esta documentación pueden resultar cruciales en la determinación del motivo de la fisuración. Identificar la ubicación y la extensión de las fisuras, así como determinar si estas causan un problema estructural, ya en la fecha de análisis o si por el contrario, serán un problema en un futuro, sea este lejano o próximo, es algo fundamental, pues con todo lo mencionado anteriormente servirá para realizar un diagnóstico correcto.

En primera instancia se debe indicar, de la manera más precisa posible, el área de la presa afectada por estas fisuras, su forma y su tamaño. Es muy importante la observación mediante inspección visual, al tratarse del único sistema que permite comprobar cuales son las zonas afectadas por una fisuración. Además el observar la presa permite ver de manera más clara si se trata de una fisuración puntual, genérica..., conceptos elementales para la determinación de una posible solución.

La fisuración superficial visible del hormigón puede aparecer a partir de una dilatación lineal de 0,04 a 0,05 % (0,4 y 0,5 mm / m), ICOLD (1991). La fisuración estructural se producirá para un valor de la expansión mayor o menor, dependiendo del estado de confinamiento. En ocasiones hay presas que presentan discontinuidades en planta

como esquinas que están formadas por varios tipos de secciones, en estos casos, la fisuración será mayor en estos puntos.

Para poder determinar el ancho de estas hendiduras, normalmente, son usados unos aparatos llamados comparadores, microscopios de tamaño reducido, que poseen una escala en la lente más próxima a la superficie analizada de manera que permite medir con precisiones de 0,025mm. Muchas veces, pero, se usa la clásica regla para realizar tal tarea, aún cuando se pierde precisión.

La fisuración, de la que podría pensarse que puede aparecer en toda la presa, suele manifestarse solo en algunas zonas, las más susceptibles. Normalmente se presenta en primera instancia en los miembros más esbeltos y menos confinados, pues en las zonas más confinadas existe una acción que se opone a la expansión. Algunos ejemplos de zonas tendencialmente afectadas por fisuración son: las paredes de los pozos, en las calzadas superiores, aliviaderos y en otras partes no masivas y poco restringidas.

Se pueden distinguir dos formas bien diferenciadas de fisuración, por un lado, la fisuración mapeada, figuras 4.1 y 4.2, consecuencia de una expansión diferencial en los componentes del hormigón y debido a la inexistencia de restricciones, como pueden ser armaduras o cargas, y por otro lado, en algunas situaciones se puede generar un estado de tensiones que provoque la apertura de fisuras orientadas. Así, en presas bóveda, debido al desplazamiento de la coronación respecto a los estribos, se observan fisuras en la interfase presa-terreno que acompañan más o menos la pendiente de la cimentación, Hill (1995). Un comportamiento similar también se observa en presas de contrafuertes en las que se observan fisuras aproximadamente horizontales en las cotas más inferiores de los muros, Van Den Berg y Seddon, (1991).

Es muy importante el estudio y análisis de las fisuras en diferentes estructuras de la misma presa, sobretodo, ante la existencia o no de esfuerzos fruto de acciones externas o del peso propio. Pues la existencia, por ejemplo, de altas compresiones podría impedir la aparición de las fisuras en zonas donde la expansión genera tracción.

En la figura 4.3, Araújo (2008), se aprecia, en los dientes de pie de presa y en la viga del cuenco de amortiguamiento de la presa de Tavàscan, una fisuración enramada típica de las reacciones expansivas. En la figura 4.4, Araújo (2008), se muestra un detalle de viga superior de la caseta de acceso a la galería de la presa de Graus en la que se puede apreciar, además de algunas zonas con fisuras enramadas, una grieta prácticamente horizontal. En este caso, debido a la existencia de la armadura, la fisura termina alineándose a la misma.

Por otro lado, las restricciones horizontales provocadas por los estribos de las presas, pueden generar la formación de fisuras horizontales cerca de coronación, fruto de la interacción presa-terreno.



Figura 4.1- Fisuración mapeada



Figura 4.2- Detalle de la figura 4.1



Figura 4.3- Dientes de pie de presa con fisuración enramada (Araújo, 2008b)



Figura 4.4- Fisura horizontal en el acceso a la galería de Graus (Araújo, 2008b)

Existe un fenómeno particular que puede generar otro tipo de fisuración orientada debido a las reacciones expansivas, fisuración que vendría generada como consecuencia de una torsión. Los movimientos relativos entre los bloques de hormigón pueden generar un esquema de fuerzas semejante al presentado en la figura 4.5, que generaría una fisura con una traza teórica igual a la línea roja de la figura ya mencionada. Este fenómeno podría verse potenciado por fuerzas hidrostáticas, siempre presentes en las presas.

La expansión del hormigón genera que los bloques de una presa puedan moverse en planta y en alzado. Si se da el caso que los bloques se mueven con un esquema equivalente al que se presenta a continuación en la figura 4.6, con casi total seguridad las fisuras serán debidas a la torsión que se ha presentado en el párrafo precedente.

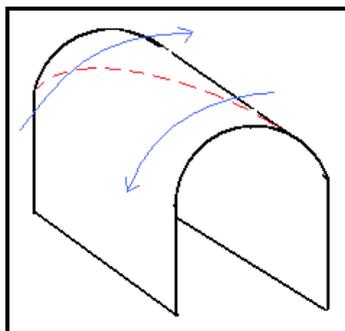


Figura 4.5- En rojo discontinuo podemos ver la traza de una fisura en galería provocada por torsión

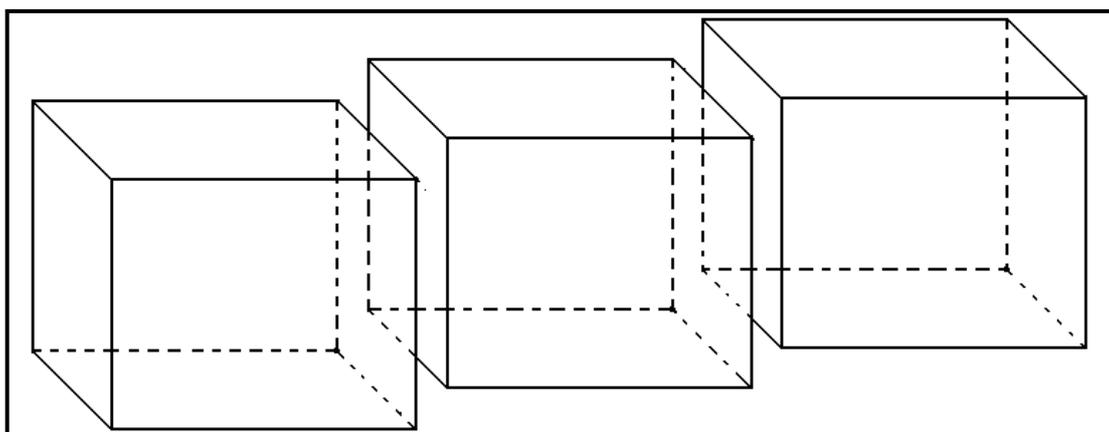


Figura 4.6- Esquema de los movimientos relativos entre bloques que podrían generar torsión en una presa. El bloque derecho, se mueve, en relación al movimiento de los bloques que quedan a su izquierda, hacia atrás (pudiendo ir hacia aguas arriba o aguas abajo) y hacia arriba.

La fisuración oblicua, que se presenta en las galerías debido a la torsión, suele comenzar en el hastial de uno de los paramentos para ir cambiando su posición hasta finalizar, si la galería es lo suficientemente larga, en el hastial del paramento opuesto.



Figura 4.7- Fisura en un paramento de galería



Figura 4.8 Fisura en la parte más alta de la galería

La sollicitación generada por este estado tensional puede tener otro tipo de efectos, no sólo fisuras en galerías. Otro síntoma asociado sería una ligera diferencia en la inclinación de las fisuras en el paramento aguas arriba y aguas abajo, lo que permitirá tener un argumento más para dirimir si se trata o no de una expansión química que genera torsión.

4.2.2.- Productos de la reacción

De las tres reacciones existentes, sólo en la reacción álcali-carbonato no aparece un producto de la reacción. En el caso de la reacción, álcali –sílice en las fisuras se podrá detectar en muchas ocasiones la presencia de gel, que se puede confundir con carbonato cálcico y que tiene una apariencia de color marrón o transparente, y es de textura resinosa

si está húmedo. En el caso que esté deshidratado deja unos depósitos blancos. Para el ataque sulfático un buen indicador es la presencia de un material color marrón oscuro debido a los hidróxidos de hierro formados en la reacción primaria, reacción (2.6). Este material puede ser transportado por el agua y depositarse en las canaletas de las galerías o bien causar la aparición de manchas superficiales en el hormigón. Además, en las zonas poco ventiladas como las galerías, es posible sentir un olor desagradable debido a los compuestos de azufre.



Figura 4.9- Gel producto de la reacción en la presa de Belesar, (Herrador,2002)



Figura 4.10 - Productos de la reacción en la presa de San Esteban

4.2.3.- Movimientos remanentes

Como ya se ha comentado, además de los síntomas que pueden ser identificados a simple vista y los problemas observados en el funcionamiento de los equipos, una consecuencia directa y muy importante del fenómeno expansivo en presas de hormigón, se presenta en los movimientos no recuperables registrados por los sistemas de auscultación.

En algunos casos como en presas con tipología de planta recta que ya cuentan con alto grado de desarrollo de las expansiones, puede que los desplazamientos sean detectados a simple vista, en cambio en presas arco o bóveda, la curvatura y la concepción de funcionamiento de transmisión de cargas en el eje longitudinal dificultan la observación de movimientos relativos entre los distintos bloques.

Al producirse la expansión, el hormigón aumenta su volumen, esto genera un nuevo estado tensional. Los desplazamientos relativos entre los bloques de hormigón se producen para poder liberar energía y así aliviar tensiones lo que genera, a veces consecuencias graves.

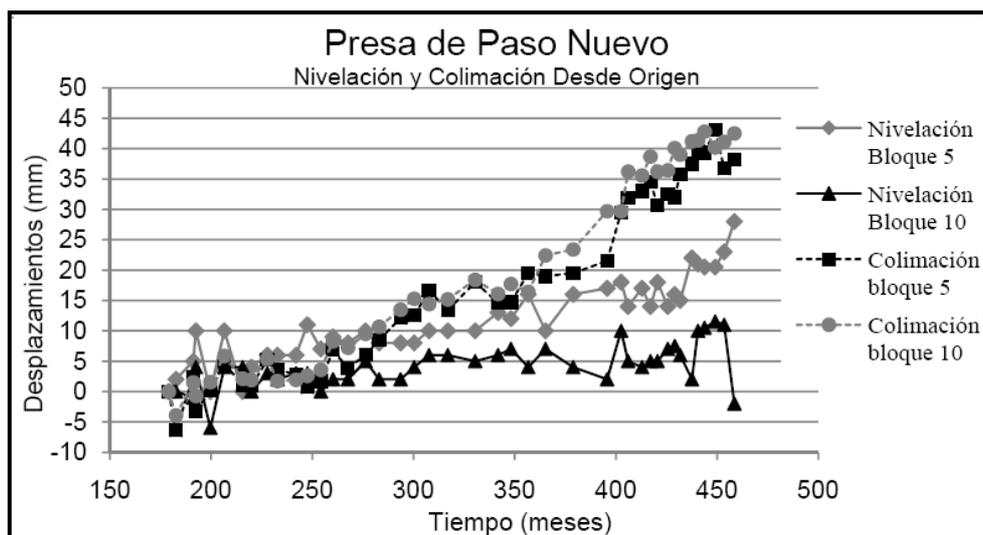


Figura 4.11.- Evolución en el tiempo de los movimientos de nivelación y colimación en coronación en la presa de Paso Nuevo (Espinós et al., 2008).

Dependiendo de las características de la presa estos movimientos se manifestaran de forma diversas, pero aún así, son consecuencias comunes: la variación en la apertura de las juntas, los problemas en el funcionamiento de equipos, la expulsión de los productos de estanquidad... mediante los cuales puede detectarse la expansión con una inspección visual, siendo pero los sistemas de auscultación los que deberán valorar cuantitativamente estos movimientos.



Figura 4.12 - Desajuste del riel de San Esteban



Figura 4.13- Barandilla curvada en la presa de Rumedo

4.2.4.- Variación de la apertura de juntas

La variación en la apertura de las juntas es otro de los síntomas que aparecen como consecuencia de una reacción expansiva. Las juntas de dilatación funcionan como una cámara que permite los movimientos relativos de los bloques, además de consentir las variaciones volumétricas derivadas de los cambios estacionales. Debido a la expansión se

observan variaciones de su apertura que, en general, presenta un cierre progresivo. En el caso de que exista material de relleno o sellado, el aplastamiento y expulsión de dichos materiales facilita la detección de movimientos de cierre.

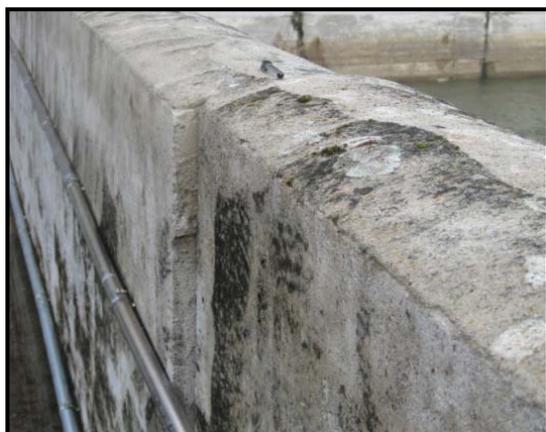


Figura 4.14- Movimiento relativo entre dos bloques de San Esteban



Figura 4.15- Movimiento relativo entre dos bloques de San Esteban



Figura 4.16 - Vista aérea del movimiento relativo entre bloques



Figura 4.17 - Movimiento de la junta longitudinal de la presa de Rumedo

4.2.5.- Problemas en el funcionamiento de equipos

Los problemas de funcionamiento de equipos también representan un buen indicador del desarrollo de expansiones, dado que la alteración volumétrica del hormigón adyacente puede provocar dificultad de operación de partes móviles, pérdida de alineación de ejes y exceso de vibración y ruido.

4.3.- DIAGNÓSTICO. SISTEMÁTICA DE TRABAJO

El diagnóstico es una de las etapas fundamentales, por no decir la etapa fundamental, en el análisis de las estructuras que sufren expansiones de hormigón, pues los métodos existentes para mitigar y solucionar esta patología van estrechamente ligados al hecho de conocer cuál es y el porqué del problema real que padece el hormigón que se está

estudiando, al ser muchas y diversas las soluciones a adoptar. Diagnosticar la patología exacta que padece un hormigón, las causas de la misma y su desarrollo temporal se intuye pues de vital importancia.

Existen muchos criterios para realizar un buen diagnóstico. La intención del presente texto es presentar al lector un guía de los pasos que debe seguir una vez han sido detectados unos síntomas que hacen suponer que algún fenómeno extraño, quizás relacionado con la expansión, se está manifestando. Las actuaciones recomendadas y su orden cronológico son resultado de una larga reflexión.

Para poder garantizar el éxito en el tratamiento de una presa se propone a continuación una metodología de trabajo. El esquema se basa en diferentes acciones, divididas en tres grandes grupos: estudios preliminares, acciones de campo y estudios de gabinete. Los dos primeros están pensados tanto para el técnico de explotación responsable de la presa, como para los inspectores que se hacen cargo de las revisiones periódicas. Si los estudios preliminares apuntasen hacia el posible desarrollo de reacciones expansivas sería necesario encargar estudios más específicos.

Es necesario remarcar que el análisis ha de ser realizado en conjunto, de manera multidisciplinar, pues cada uno de los factores analizados por sí solos no pueden dar lugar a un diagnóstico, pues sería erróneo con casi toda seguridad.

Finalmente, se pretende enumerar los estudios de laboratorio y de gabinete que deberían realizarse con el fin de diagnosticar el origen de la patología y así poder verificar la incidencia de las expansiones en el comportamiento estructural de la presa.

4.3.1.- Consideraciones generales

En este apartado se presenta la secuencia de los trabajos que se deben desarrollar en el estudio de presas de hormigón afectadas por reacciones expansivas, tal como se muestra en el organigrama de la figura 4.18, en él se observa que la investigación está dividida en tres grandes grupos: trabajos previos, campaña experimental y estudios analíticos y numéricos, que a su vez se subdividen en otras acciones.

El análisis conjunto de los resultados obtenidos en las tres etapas de los trabajos previos (análisis de la documentación, estudio de la formación geológica y visita a la presa y su entorno), permite hacer una composición de la situación de la presa con el fin de formular una primera hipótesis de trabajo. Sin embargo, es importante resaltar que, en el inicio de una investigación no se debe descartar ninguna posibilidad del origen de la patología hasta que los estudios posteriores lo demuestren claramente.

En la fase siguiente, (campaña experimental sobre testigos de hormigón extraídos de la presa o bien sobre probetas moldeadas en laboratorio), se identifica la causa principal de los comportamientos anómalos observados, así como las causas secundarias que le pueden sumar efectos.

Una vez conocido el diagnóstico, el paso siguiente consiste en la comprobación y confirmación del comportamiento global de la presa, utilizando un planteamiento integrador: en el nivel de microescala mediante la simulación numérica de los procesos reactivos, en el nivel de mesoescala en el que se representa específicamente las fases

componentes del hormigón y, finalmente, la determinación de los efectos que se producen en el nivel estructural de la presa.

El estudio de las presas con patología expansiva requiere realizar especial hincapié en el planteamiento integrado. La modelización en el nivel de micro y mesoescala del comportamiento expansivo en función de las características del material y frente a las condiciones de exposición son fundamentales para iniciar un análisis a macroescala.

Por otro lado, los resultados obtenidos en cada una de las etapas del estudio deben ser contrastados con el comportamiento observado en la estructura. La propia presa es el mejor modelo de la realidad estructural.

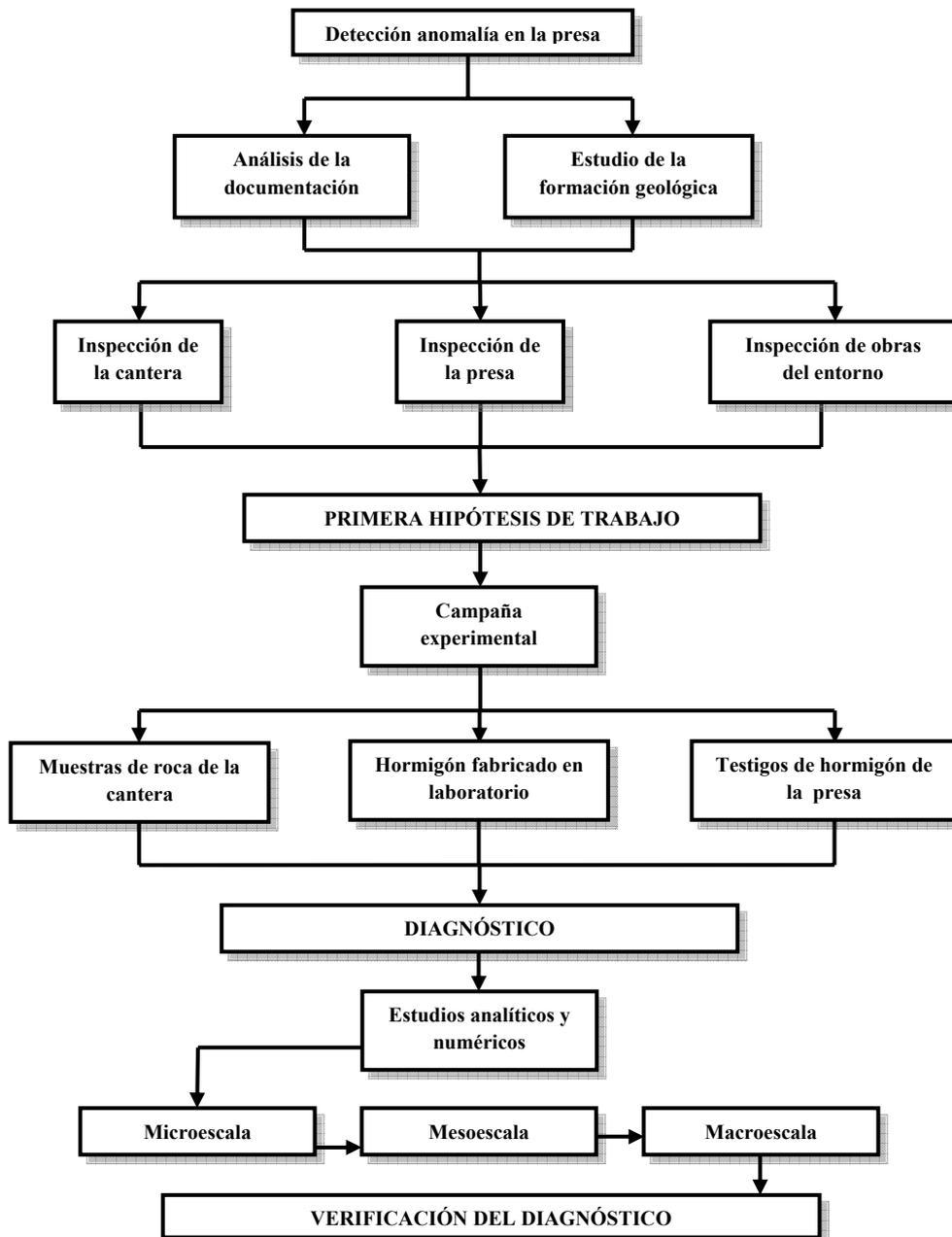


Figura 4.18 - Organigrama de las etapas de estudio

4.3.2.-Trabajos iniciales

4.3.2.1.- Análisis de la documentación histórica de la presa

En esta fase se recogen los datos documentales que permiten reconstituir la historia de la presa incluyendo cualquier evento o factor relevante de la fase de construcción y/o explotación. De los diversos documentos que pueden ser de interés se puede citar López *et al.* (2002).

- Informes diversos (libro de presa que debe abarcar la fase constructiva y la de explotación, visitas realizadas, estudios anteriores internos de la empresa o bien encargados a otras instituciones).
- Planos descriptivos de la presa (plantas, perfiles, detalles).
- Fotografías.
- Proyectos y descripción de obras de reparación u otras obras realizadas.
- Datos recogidos por el sistema de auscultación.

En muchos casos es fácil encontrarse que recuperar esa documentación no es tarea sencilla, por lo que será importante recuperar pequeños detalles (fechas de aparición, aspecto y ubicación de fisuras, humedades en paramentos, filtraciones excesivas, manchas superficiales, comportamiento de las juntas, sistema de auscultación instalado, movimientos no recuperables, etc.) que puedan permitirnos rehacer la historia.

La información que se obtiene en esta etapa, va a dirigir los pasos siguientes a realizar, sin condicionar, eso sí, las observaciones de campo, hecho que podría alterar de manera inconsciente los resultados de la investigación.

4.3.2.2.- Estudio teórico de la formación geológica

La formación geológica de donde provienen los áridos con los que se realizó el hormigón de la presa es el objetivo del estudio de la fase siguiente. Conocer la roca y sus constituyentes se considera fundamental para poder realizar unas hipótesis fidedignas, ya que con este estudio se puede determinar si existe algún tipo de compuesto que pueda reaccionar causando las expansiones del hormigón. En España la fuente más relevante que existe es la del Instituto Geológico y Minero de España (1971).

No encontrar una formación geológica potencialmente perjudicial no es condición suficiente para descartar la existencia de reacciones expansivas en el hormigón de la presa.

4.3.3.- Visita e inspección de la presa y de su entorno

Con las informaciones preliminares aportadas por los estudios anteriores se procede a la observación *in situ* de la estructura y de su entorno. Esta etapa es muy importante porque mediante observaciones visuales se pueden detectar varias anomalías que en algunos casos no son detectables por otros sistemas de control. Por otro lado, Cajete y Gil (2000) destacan la inspección visual como acción imprescindible, al aportar una valiosa información complementaria a la auscultación, ya que a lo largo de la vida de la presa se acumula una gran carga de información visual que debe ser registrada y sistemáticamente documentada. En el caso de las expansiones este hecho es si cabe más importante pues la fisuración enramada, por ejemplo, que es uno de los síntomas más evidentes de la existencia de expansiones no es detectable por otros sistemas.

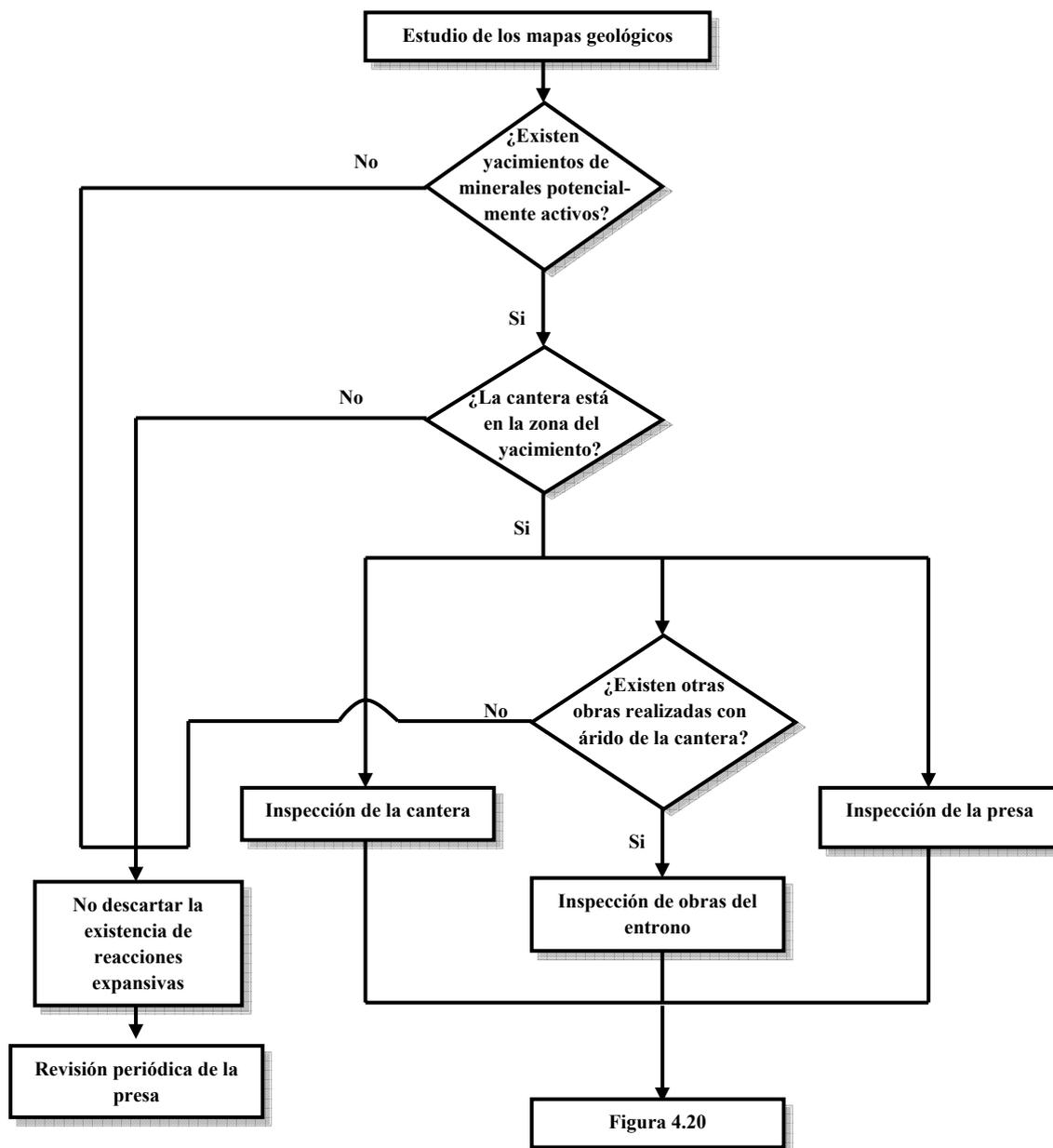


Figura 4.19 - Organigrama de las etapas del estudio geológico

La visita a obra puede ser dividida en:

- Inspección de la formación geológica
- Visita a obras del entorno
- Inspección de la presa y elementos auxiliares

La inspección de la presa y de sus alrededores debe aprovecharse para establecer contacto con las personas que mas conviven en ella y con ella pues son los que mejor la conocen y son por tanto los que pueden fácilmente darnos información de gran valía.

Es importante realizar buenos informes, escritos y gráficos, de dichas experiencias para evitar que otros, que lleguen a posteriori se puedan encontrar con las mismas dificultades.

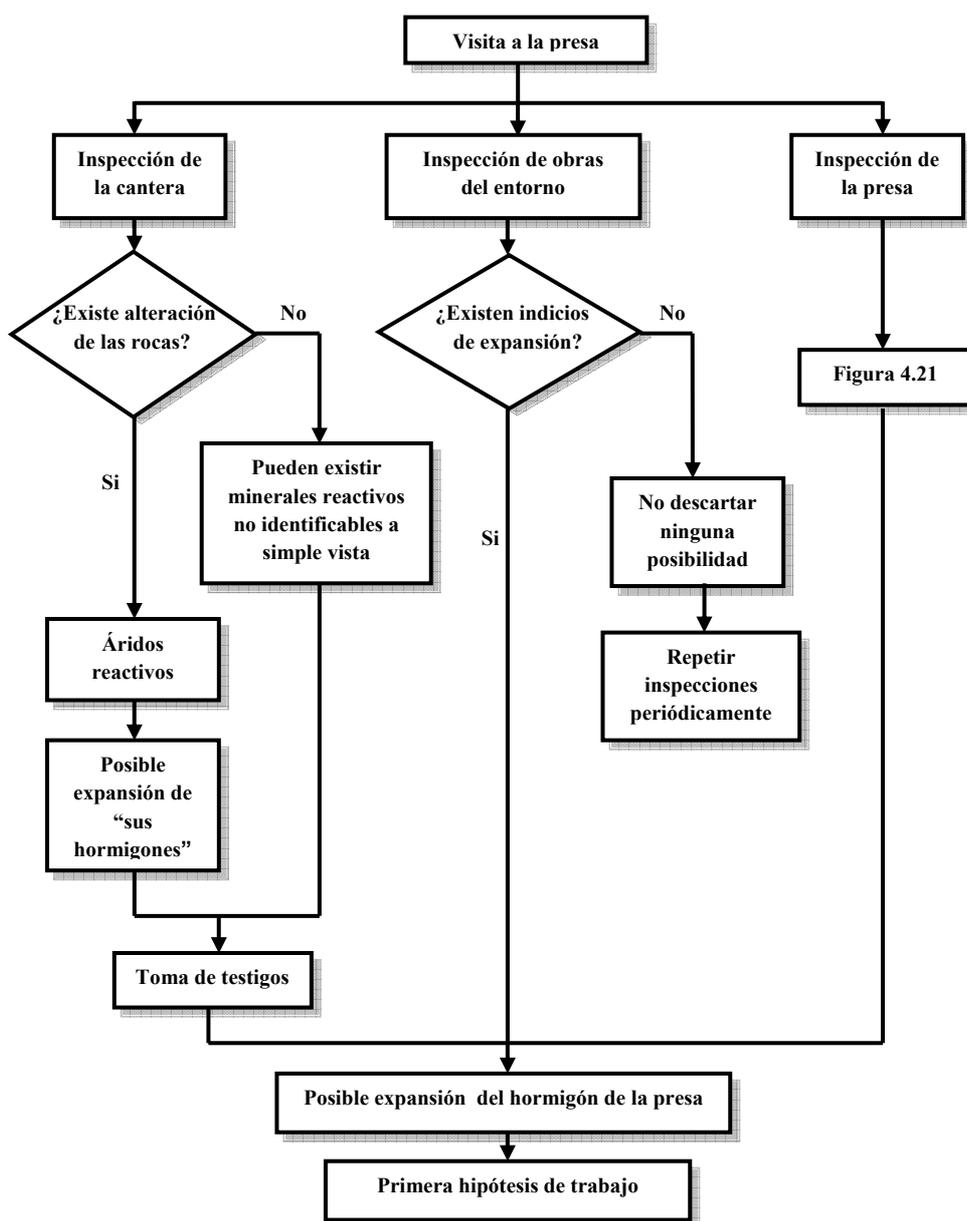


Figura 4.20 - Organigrama de la visita a la presa

4.3.3.1.- Inspección de la formación geológica

En esta etapa, hay que estar atento a la presencia de manchas superficiales o de productos colgados en la roca, ya que son un indicio de la presencia de minerales potencialmente alterables en exposición al aire libre. Si la roca de la cantera presenta señales de alteración es muy probable que el árido contenga minerales que bajo determinadas condiciones de exposición reaccionen con los compuestos de la pasta de cemento. Aunque en determinados casos los productos generados de la meteorización natural de la roca pueden ser observados visualmente, la ausencia de indicios no significa la inexistencia de minerales perjudiciales al hormigón. En este caso se debe proceder a la recogida de la muestra para el análisis de sus compuestos minerales en laboratorio.

La inspección visual del entorno de la obra, aunque no sea del todo concluyente, puede aportar información bastante útil y que sirve de punto de partida en el análisis preliminar del diagnóstico. Sin embargo, la identificación de la presencia de minerales potencialmente reactivos y sus productos de alteración debe ser confirmada o descartada mediante ensayos de laboratorio llevados a cabo en muestras de roca recogidas en la cantera, preferentemente restos del machaqueo.

4.3.3.2.- Inspección de obras del entorno

Las obras del entorno de la presa que hayan sido realizadas con el mismo tipo de áridos son una base documental muy importante. Por sus características estructurales (relaciones superficie/volumen altas y sollicitaciones bajas) las reacciones expansivas se manifiestan, si las hay, a edades más tempranas, lo que puede permitir su detección en la presa con mayor facilidad. Una vez más, la inexistencia de estas reacciones, o de su sintomatología en los hormigones de las estructuras vecinas no es condición suficiente como para descartar esta patología.

4.3.3.3.- Inspección de los elementos auxiliares y del cuerpo de presa

La inspección debe abarcar tanto los elementos auxiliares como el cuerpo de la presa. Los signos de desarrollo de reacciones expansivas, principales, más comúnmente encontrados y que se pueden observar en la visita son:

- Elementos auxiliares: fisuración enramada o alineada con las armaduras y exudación de productos de reacción...
- Cuerpo de presa: fisuración enramada, fisuración orientada, exudación de productos de reacción, movimientos de bloque y otros elementos, variación de la apertura de juntas y atascos de partes móviles de equipos experimentales...

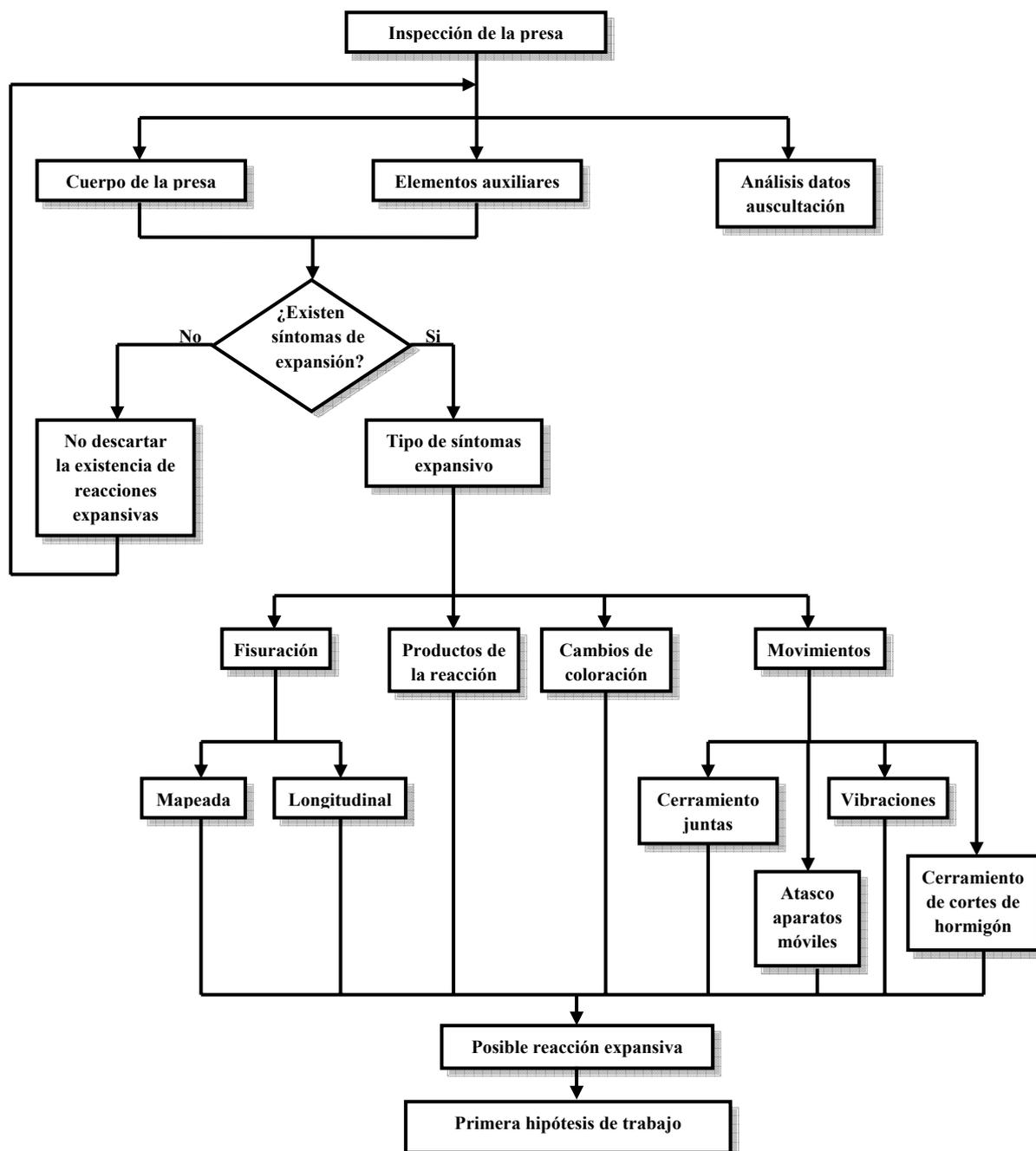


Figura 4.21 - Organigrama de la inspección de la presa

4.3.4.- Campaña experimental

Son muchas las teorías que intentan guiar al usuario de cuáles deben ser los pasos a seguir en un análisis experimental. Después de un estudio detallado se cree que la secuencia más lógica y natural es aquella que realiza varios estudios para determinar la reactividad de los áridos y de los hormigones que con estos se fabrican, y que se complementa con un análisis del comportamiento de una serie de muestras extraídas directamente de la presa. Además estos ensayos deben simultanearse con otros realizados en la propia presa.

Los ensayos y estudios presentados a continuación se refieren en su base genérica a la normativa americana, pues nadie duda que es la referencia para la comunidad internacional.

4.3.4.1.- Ensayos en áridos y en hormigón fabricado en laboratorio

La fabricación de hormigón en el laboratorio tiene dos aplicaciones principales: prevenir el desarrollo de las reacciones expansivas previamente a la construcción de la presa, interviniendo fundamentalmente en la elección del cemento y áridos empleados en la mezcla, y la segunda, comprobar si el tipo de hormigón encontrado en la estructura ha desarrollado o puede desarrollar una reacción expansiva. La susceptibilidad a la expansión química puede verificarse mediante ensayos sobre árido o sobre mortero de acuerdo con las normativas, donde aparecen particularidades significativas para cada uno de las tres reacciones presentadas en este documento.

4.3.4.1.1.- Alkali-sílice

Se han concebido, con el tiempo, múltiples ensayos para poder determinar, mediante campañas experimentales, las posibilidades de desarrollo de la reacción álcali-sílice y su consecuente expansión del hormigón. Se desaconseja, pero, utilizar de manera individual estas técnicas, pues, como en todo, es bueno analizar distintos resultados obtenidos de diversas maneras antes de tomar ninguna decisión al respecto.

Los ensayos más relevantes por la información que aportan en cuanto a la potencialidad reactiva de un árido son: análisis petrográfico, ensayo de barra de mortero para determinar la reactividad potencial y el ensayo químico.

Análisis petrográfico para áridos, ASTM C 295

Este documento contiene una práctica normalizada para la realización de un examen petrográfico que permite determinar la estructura y la composición cuantitativa de los áridos utilizados en la fabricación del hormigón.

Mediante este tipo de trabajo se puede conocer las cantidades de minerales reactivos, cantidades que serán aceptadas o rehusadas según las recomendaciones que exponen el mismo método. Este procedimiento garantiza una buena eficiencia en la valoración de las rocas i reactivos más estudiados por los equipos de investigación.

Para conocer en mayor medida los detalles de este tipo de examen uno se debe remitir a la norma que lo rige.

Ensayo de barra de mortero para determinar la reactividad potencial, ASTM C227

Este es el método más utilizado para determinar la reactividad potencial frente a los álcalis. El Apéndice de la norma ASTM C 33 indica los criterios de aceptación que se utilizan para evaluar los resultados de los ensayos realizados conforme la norma ASTM C 227. Este procedimiento es útil no solo para evaluar los agregados, sino también para evaluar combinaciones particulares de cementos y agregados. Se debe anticipar que ciertas rocas metamórficas silíceas no desarrollaran reacciones expansivas cuando sean

almacenadas a temperaturas iguales o inferiores a los 38°C. Para que los materiales evidencien signos de reactividad son necesarias temperaturas más elevadas y largos periodos de tiempo, de 1 a 3 años.

Diferentes laboratorios de numerosos países están introduciendo pequeñas variaciones a este método de ensayo para poder determinar en tiempos menores cual es la situación de los agregados estudiados.

Ensayo químico para determinar la reactividad potencial ASTM C 289

Este es un método nato con la intención de realizar valoraciones relativamente rápidas en materia de reactividad. Este procedimiento permite en pocos días hacer una primera extracción de resultados, que requieren una interpretación cuidadosa y detallada. Es también el Apéndice de la norma ASTM C 33 que presenta un criterio de análisis de resultados.

Este método mide la reactividad puzolánica del agregado aproximadamente a la temperatura máxima alcanzada por la mayoría de los hormigones durante la fase de curado inicial, enfatizando así la identidad esencial de la reacción álcali-sílice y la reacción puzolánica. Cabe remarcar que este método ha sido cuestionado para la evaluación de agregados livianos.

A nivel genérico debemos resaltar que la lenta cinética de las reacciones es una desventaja considerable para algunos ensayos al retrasarse la obtención de resultados, y por tal motivo se emplean ensayos acelerados, aunque éstos pueden no estimar un valor coherente de la expansión ya que intervienen otros factores que pueden enmascarar los resultados (Shayan, 1998).

4.3.4.1.2.- Álcali-carbonato

Tratándose, ahora también, de una reacción expansiva, los conceptos básicos que permiten conocer la reactividad potencial del árido son esencialmente los mismos que aquellos expuestos en el caso de la reacción álcali-sílice, aún siendo las normativas de ensayos distintas las unas de las otras.

Los ensayos más relevantes por la información que aportan en cuanto a la potencialidad reactiva de un árido son: análisis de la textura, método petrográfico del árido, método del cilindro de roca y reacción álcali-roca carbonatada en prismas de hormigón.

Textura

Este examen se utiliza para caracterizar e identificar las características de las rocas que son objeto del estudio. En general las rocas reactivas se pueden caracterizar por tener rombos dolomíticos, que pueden presentar unas dimensiones que oscilan entre 1 i 200 μm , en un fondo de calcita más fina y residuo insoluble.

Si se detecta la presencia de una o más dolomías en una roca carbonatada de grano fino se debe realizar el ensayo del cilindro de roca.

Método petrográfico del árido, ASTM C 295

Este método se utiliza para determinar si existen o no rocas reactivas y determinar sus constituyentes reactivos de manera cuantitativa.

Como en el análisis mediante estudio de la textura, si se detecta la presencia de una o más dolomías en una roca carbonatada de grano fino se debe realizar el ensayo del cilindro de roca. Es recomendable, también, antes de pasar a este nuevo ensayo, valorar si la proporción de residuo insoluble, generalmente arcilla, con respecto a la porción de árido dolomítico es la típica que desarrolla esta patología.

Método del cilindro de roca, ASTM C 586

Es un método que se basa en la expansión observada en probetas cilíndricas de rocas carbonatadas, que se sumergen en una solución de NaOH a temperatura ambiente.

Se suele tomar como señal de peligro una expansión mayor al 0,10% a los 84 días de ensayo. En el caso de que se llegue a este punto se recomienda la realización del ensayo de expansión de prismas de hormigón.

Reacción álcali-roca carbonatada en prismas de hormigón, ASTM C 1105

Este ensayo trata de determinar la susceptibilidad de la combinación de cementos y áridos usados en obra frente a la reacción álcali-carbonato, mediante la medida del cambio de longitud del prisma de hormigón. Se suelen ensayar otras combinaciones de cemento y árido para realizar una comparativa.

Este ensayo que se considera fundamental es discutido en algunos trabajos donde se dictamina que sólo debería realizarse como ensayo preliminar.

Por otra parte, mencionar que gracias a este estudio se informa que la expansión de los hormigones elaborados con rocas carbonatadas altamente reactivas se podría reducir a valores seguros solamente si el contenido de álcalis del cemento expresado como Na_2O equivalente fuese menor a 0,45 ó 0,40.

4.3.4.1.3.- Ataque sulfático

El tercer tipo de reacción que causa expansión en el hormigón, si bien también ha sido sujeta a intensos estudios mediante muestras de hormigón en solución de sulfato de sodio o de magnesio que se han almacenado en los laboratorios, se ha tratado con mucho más rigor en estudios basados con muestras reales de hormigón, exámenes de lo que se hablara próximamente.

Ensayo de expansión potencial de morteros de cemento portland expuestos a sulfatos, ASTM C 452.

El presente método de ensayo, que sólo es aplicable a los cementos portland, se refiere a la determinación de la expansión de barras de mortero a partir de una mezcla de cemento portland y yeso en proporciones tales que la mezcla contenido en masa de SO_3 sea del 7,0 %.

La adición máxima de SO_3 que causa una expansión nominal nula después de 2 días de curado se adopta como la adición óptima de SO_3 al cemento; dicho valor se denomina “contenido óptimo de sulfatos de Lerch”, Alaejos y Bermúdez (2003).

Método de cálculo del sulfato soluble en cemento de mortero hidráulico, ASTM C265

Este método de ensayo está destinado a mostrar si el sulfato de calcio que ha sido utilizado en la fabricación de cemento lo ha sido en una cantidad tal que pueda dejar sulfatos disueltos en el mortero endurecido, lo que sería, de ser así, muy perjudicial para la presa. A su vez también se determina el contenido óptimo de SO_3 .

4.3.4.2.- Ensayos en testigos de hormigón

En el caso específico de presas que tengan reacciones expansivas, el estudio sobre testigos extraídos de la presa permite evaluar si el hormigón tiene expansiones y el tipo de reacción que las causa, además de permitir establecer, una posible, extensión de los daños y correlacionar los efectos.

Para ello es necesario planear una campaña de extracción de testigos que garantice la representatividad del hormigón de la presa, permitiendo tener un diagnóstico fiable del origen de la problemática presentada. Así, se deben sacar del hormigón de zonas sanas y de zonas con señales de deterioro. Asimismo, siempre que sea posible, es importante analizar hormigones de distintas zonas de la presa, como por ejemplo: de galerías, de paramentos a cotas inferiores y cerca de coronación...

En esta fase se realizan distintos ensayos de laboratorio que deben ser cuidadosamente evaluados para verificar aquellos que pueden ser aplicados a cada caso específico. En el caso de reacciones expansivas, los ensayos se deben centrar en la identificación de los minerales presentes en el árido que pueden ser potencialmente perjudiciales para el hormigón y, sobretodo, deben tratar de verificar si se forman compuestos expansivos como por ejemplo geles y etringita secundaria. Para todo esto se deben llevar a cabo ensayos químicos, mineralógicos y microscópicos.

Además, los trabajos de laboratorio también permiten analizar las hendiduras. Su ancho y su profundidad se pueden medir con cierta facilidad y con un alto grado de precisión. Si se extraen testigos sanos, se puede realizar, también, una comparativa entre estos y los fisurados, llegando a conocer, mediante, por ejemplo, el ensayo de resistencia a compresión, el estado general del hormigón de la presa. A todo esto hay que contemplar el hecho que este tipo de estudio permite conocer la edad de las fisuras permitiendo estimar el tiempo que lleva desarrollándose la expansión del hormigón.

4.3.4.2.1.- Alkali-sílice

Examen petrográfico del hormigón, ASTM 856

Con este examen se pretende establecer si ha existido o no una reacción álcali-sílice y que constituyentes de los áridos han participado en ella y sobre todo cuáles han sido las consecuencias padecidas por el hormigón de la presa.

Las evidencias que la reacción puede haber dejado y que más fácilmente se identifican con el microscopio óptico son la fisuración y la presencia de áridos silíceos reactivos, así como la presencia de gel en los huecos o en las fisuras, como también la reducción del hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Existen también otros procedimientos dentro del mismo tipo de estudio, más elaborados y costosos que permiten inclusive detectar cantidades inusuales de CaO o de MgO libres o sus respectivos productos de hidratación.

Ensayo de expansión, ASTM C1295

La base de este ensayo se encuentra en la medición del aumento de longitud que experimentan unos prismas de hormigón que se mantienen en unas condiciones determinadas, 38°C i una humedad relativa de 100%.

Con este ensayo, se obtiene también, información interesante acerca de si se ha dado alguna reacción o de si existe la posibilidad de una expansión potencial del hormigón de la presa en estudio.

En algunos casos, si la reacción ha cesado no se observa expansión, pero podría permanecer sílice reactiva latente en el hormigón, que para poderse detectar exige ser sumergida en una solución de hidróxido de sodio, donde va a causar una expansión que puede ser medida, para a posteriori ser valorados sus posibles daños.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El Microscopio electrónico de barrido (o SEM, de *Scanning Electron Microscopy*), es un microscopio que usa electrones en lugar de un haz de luz para formar las imágenes, esto consiente una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra, produciendo imágenes de alta resolución.

Esta técnica se usa tanto para el estudio de la morfología de los compuestos amorfos como para el estudio de los geles que son productos de la reacción y forman parte de la estructura del hormigón y que no son siempre detectables por los rayos X.

Ensayos no destructivos

Se denomina ensayo no destructivo a aquellas pruebas realizadas en un material y que no implican la alteración de las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales básicas del mismo para la obtención de los resultados.

Estos métodos se basan en métodos físicos tales como la medición de ultrasonidos a través del hormigón de la presa o la determinación del módulo dinámico elástico que sirven en este caso para determinar el deterioro de la estructura de hormigón por la reacción álcali-sílice, inclusive antes de que se den manifestaciones visuales de la reacción expansiva.

Es interesante remarcar que no existe una relación biunívoca entre los resultados obtenidos en el laboratorio y el grado de expansión padecido por el hormigón de la presa

estudiado, pues existen una serie de factores, como puede ser el rango de reactividad, que afectan en los resultados.

4.3.4.2.2.- Álcali-carbonato

Examen petrográfico del hormigón, ASTM 856

Este examen se realiza con la intención de determinar si se ha producido la reacción expansiva álcali-carbonato. En el caso de que se haya producido la reacción se pretende, también gracias a este ensayo, conocer los constituyentes de los áridos que han hecho posible este desarrollo, así como determinar cuáles son las consecuencias directas sobre el hormigón de la expansión. Una grandes conclusiones a las llegar es dirimir si existe micro o macro fusuración.

Examen microscópico

Este tipo de estudio confirma los tipos de componentes presentes en los agregados y sus características. Gracias a esta técnica se ha observado macro i microfisuración en los agregados y en la matriz que los rodea. En ciertas partículas se pueden ver los bordes de reacción, considerados positivos o negativos según su comportamiento al ser atacados por un ácido, como ya se comento en su debido momento. En los vacios del interior del hormigón se pueden encontrar depósitos secundarios carbonato de calcio, etringita... lo que es signo de reacciones expansivas.

4.3.4.2.3.- Ataque sulfático

Examen petrográfico del hormigón, ASTM 856

Como en los casos anteriores, este examen se realiza para determinar si el hormigón ha sufrido una reacción expansiva y la magnitud de la misma, mediante el estudio de los compuestos participantes en ella y de los productos resultantes de la misma.

Como se ha explicado en la primera parte de este documento, hay diferentes derivados del azufre que pueden generar reacciones expansivas, éstos pueden ser de procedencias diversas y esto generara que las morfologías de deterioro obtenidas gracias al examen petrográfico sean distintas dependiendo del caso.

Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica es usada para el estudio morfológico de los compuestos presentes en el hormigón que ha padecido una reacción expansiva. Este examen permite analizar la etringita secundaria presente en el hormigón, signo del ataque por sulfatos al hormigón.

La etringita puede manifestarse de formas diversas según sus características volumétricas de la zona donde se desenvuelven las reacciones que dan lugar a su formación.

La thaumasita, otro de los productos del ataque sulfatico presentado en el capítulo correspondiente a las reacciones químicas, puede presentarse en la misma zona que la

etringita o en la misma que el yeso, al tener una estructura química similar a la etringita, ambos compuestos pueden formar cristales mixtos identificables gracias a este método.

4.3.4.3.- Ensayos experimentales en fisuras de la presa

Para realizar un mayor estudio de una presa afectada por fisuración se pueden realizar en ella ensayos no destructivos que ayudaran a determinar la presencia de fisuras y vacíos internos, así como la profundidad de ambos.

Existen muchos métodos, algunos con unos requisitos tecnológicos sumamente elevados, pero por el contrario existen otros que no requieren prácticamente ninguna inversión. En este último grupo se encuentra el denominado golpe con martillo, uno de los más antiguos y a su vez más sencillos, si lo realiza un operador experimentado. Este sistema permite, fácilmente, identificar si existe alguna fisuración laminar próxima a la superficie, tan característica de la expansión en la zona de los estribos, donde hay restricciones horizontales. Es un sonido hueco el que permite determinar la existencia de este tipo de fisuración.

Dentro de este tipo de ensayos también encontramos los que se realizan según la norma ASTM C 597, y que se realizan mediante equipos de ultrasonidos no destructivos, dentro de esta tipología el método más extendido es el de transmisión pesante. En la figura 4.22 se presenta el esquema teórico de funcionamiento de este método que mide electrónicamente el tiempo que tarda una onda ultrasónica en pasar a través del hormigón. La velocidad del pulso se calcula dividiendo la medición de la trayectoria entre dos transductores por el tiempo de viaje. Esta velocidad puede ser correlacionada con la resistencia y/o rigidez del material analizado.

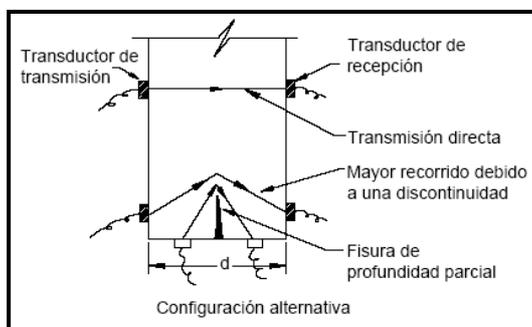


Figura 4.22 - Impulso transmitido a través del elemento

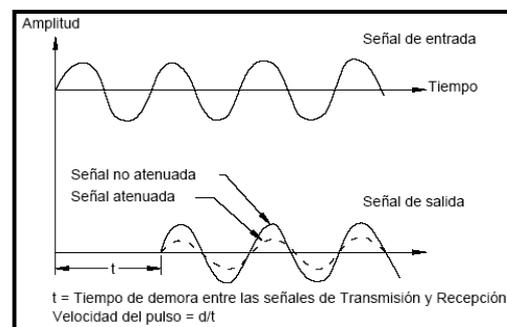


Figura 4.23 - Señal del osciloscopio

En las presas no siempre es posible acceder a la cara opuesta de un elemento, por lo que hay ocasiones en que los transductores son situados sobre la misma cara. Si se usa esta variación de la técnica anterior hay que ser conscientes que la interpretación de los resultados no es ni directa ni sencilla. La velocidad de pulso medida puede verse alterada si una discontinuidad interna hace variar el recorrido de la señal.

La interpretación de este ensayo es mucho más sencilla y fiable si se usa un osciloscopio para su representación, figura 4.23. En los casos en que se prescindiera de este aparato, si no llega ninguna señal al receptor se interpreta que existe una fisura. Obteniendo una aproximación de su magnitud al realizar distintas medidas desde

posiciones varias. Es difícil, no obstante, diferenciar entre una fisura de gran tamaño y un grupo de fisuras pequeñas con un espaciado reducido entre sí.

Habiendo visto la importancia de los ensayos no destructivos, remarcar, que estos sólo suelen realizarse como preludeo a la extracción de testigos, pues permiten conocer las zonas de la estructura que requieren un estudio más extenso y detallado.

4.3.5- Estudios analíticos y numéricos

4.3.5.1.- Estudios de microescala

En los estudios de microestructura se realiza la simulación de las expansiones mediante métodos analíticos o numéricos para determinar la cinética de las reacciones, los factores que tienen influencia en su desarrollo y las expansiones esperadas. De esta manera los resultados de esta etapa servirán como parámetros de entrada para los modelos meso y macroestructurales.

Dada la complejidad del estudio de reacciones expansivas en el nivel de microescala, el desarrollo de un modelo exige el empleo de largos tiempos de investigación e inversiones económicas relativamente altas. Por otro lado, una vez ajustado un modelo puede, con las debidas adaptaciones, ser aplicado a los diferentes casos de estudios.

En el ámbito de las reacciones expansivas se encuentran en la literatura algunos trabajos bastante completos, principalmente para las ASR, y que actualmente sirven de base para estudios posteriores. Por ejemplo gracias a estos estudios se ha podido determinar que la expansión libre debida a ASR puede expresarse según la siguiente función, Capra et al. (1995):

$$\varepsilon^{raa} = \varepsilon^{raa} (A, T, H, \sigma, t) \quad (4.1)$$

donde: A= Reactividad potencial del árido

T= Temperatura

H= Humedad relativa

σ = Tensiones de confinamiento

t = tiempo

En el ámbito de las reacciones sulfáticas no existen tantos trabajos disponibles en el ámbito numerico como en el caso de ASR, si bien los existentes son de alta calidad como los desarrollados por Casanova, *et al.* (1996, 1997), donde los autores determinan la evolución del fenómeno en el tiempo y en consecuencia el punto de su estabilización además de establecer el valor absoluto de las deformaciones inducidas.

4.3.5.2.- Estudios de mesoescala

En el estudio a escala mesoestructural se representan de forma explícita las principales fases de los componentes del hormigón en este nivel de observación: áridos de mayor tamaño, matriz de mortero e interfases. Un comportamiento diferenciado a nivel de componentes del material permite considerar el carácter diferencial de la expansión a nivel meso, que da lugar a un estado de tensiones internas que puede causar microfisuración y

daño, degradación de las características mecánicas macroscópicas, e incluso un grado de fisuración considerable en algunos elementos y sectores de presa.

Como en el nivel micro, los estudios en mesoescala también requieren un cierto grado de profundización, que no siempre se puede realizar en los casos particulares. Sin embargo, cuando la situación lo requiera y sea posible, sería aconsejable llevar a cabo este tipo de estudios que permiten evaluar el grado de expansión volumétrica para distintos estadios de confinamiento, y comparar con resultados experimentales. En esta línea se puede citar el trabajo de Comby (2006).

4.3.5.3.- Estudios de macroescala

El estudio en el nivel de macroescala (estructural) se debe llevar a cabo en dos vertientes distintas pero complementarias: la modelización numérica del comportamiento mecánico y el análisis de los datos recogidos por el sistema de auscultación.

4.3.5.3.1.- Modelos numéricos

La modelización numérica es una herramienta básica para evaluar el estado estructural de la presa. Entre los diversos métodos de análisis estructural, el de los elementos finitos se presenta como uno de los más versátiles y ampliamente difundidos.

Sin embargo, como señalan Saouma y Xi (2004), aunque la mayoría de los modelos presenten muy buena correlación con los movimientos registrados, no hay una garantía de que las tensiones obtenidas sean las que se desarrollan en las presas. No obstante, estas son las herramientas numéricas con las que se puede contar en la actualidad para el estudio del fenómeno expansivo y que deben ser empleadas siempre que sea necesario. Es importante evaluar los resultados numéricos dentro de un contexto global en el cual se deben considerar todos los aspectos (físicos, químicos, mecánicos e incluso las limitaciones de los propios métodos) desde un nivel del material, pero también constatando si las simulaciones son consistentes con el comportamiento real de la estructura.

4.3.5.3.2.- Análisis de los datos recogidos por el sistema de auscultación

Otra línea de estudio bastante útil es el análisis de los datos recogidos por el sistema de auscultación instalado en la presa. En general, los estudios de los movimientos registrados se utilizan para ajustar y verificar la concordancia de los resultados de los modelos estructurales con el comportamiento real de la presa (Saouma y Perotti, 2005). En cambio, modelizaciones a partir de los propios desplazamientos, que permitan interpretar y predecir el comportamiento de las presas afectadas por reacciones expansivas, resulta menos frecuente. Su importancia reside en que se evalúa el comportamiento de la estructura directamente de los desplazamientos reales medidos, empleando únicamente una función analítica.

La metodología de análisis mediante un modelo matemático exponencial propuesta por Aguado *et al.* (1998) permite analizar la componente no recuperable de los movimientos. Este estudio permite estimar indicadores y parámetros importantes, tales como tiempos de estabilización del fenómeno, movimientos máximos previstos y situación actual. Ello se fundamenta en la idea de que el mejor laboratorio es el comportamiento real de la presa.

Se ha podido apreciar que si el registro de mediciones es suficientemente extenso hasta una vez pasado el punto de inflexión, la herramienta permite hacer una predicción de la tendencia de evolución de los desplazamientos.

La simplicidad de implementación de esta metodología, unida al valioso aporte para el análisis y la toma de decisiones en el ámbito de las presas de hormigón, aconsejan el empleo de esta herramienta en casos de anomalías por reacciones expansivas.

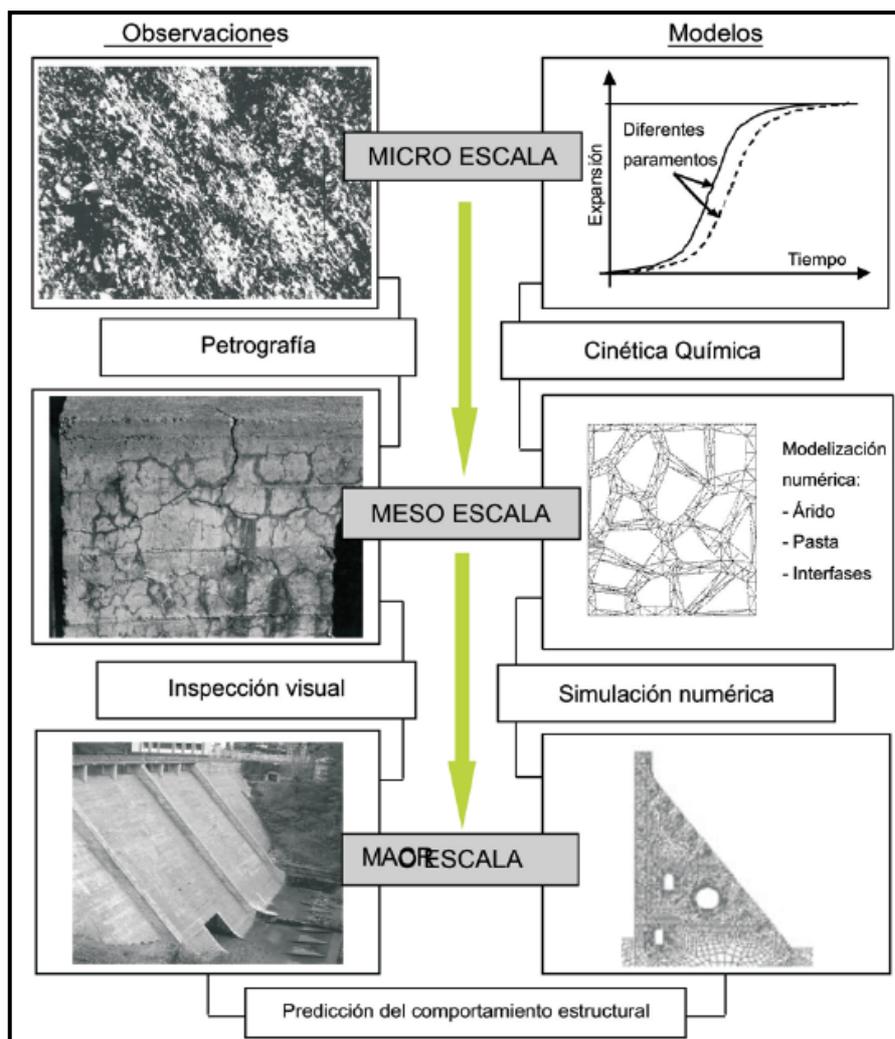


Figura 4.24– Esquema de paso de la micro escala a la masoescala, (Aguado *et al.* ,1998)

La figura 4.24, Aguado *et al.* (1998), resume de forma esquemática y sencilla lo expuesto en las últimas páginas de este capítulo. Ésta refleja muy bien el paso de la microescala a la macroescala, previo paso intermedio por la mesoescala, considerado de gran importancia ya que la composición interna a este nivel es la que determina el comportamiento mecánico del hormigón a una escala de orden centimétrico en la que se comienzan a desarrollar las fisuras.

Capítulo 5

Tratamiento de presas de hormigón con expansiones

5.1.- INTRODUCCIÓN

La Rehabilitación y el mantenimiento de una presa y sus obras anejas son las tareas más importantes a desarrollar durante el periodo de explotación de la misma. Dependiendo de las causas que puedan ocasionar la necesidad de que una presa sea intervenida existen una serie de medidas correctoras que permiten en los distintos casos asegurar el buen funcionamiento de la obra civil tratada.

Las expansiones de hormigón, como se ha venido explicando a lo largo del texto, pueden ser ocasionadas por distintas reacciones y pueden, por este motivo, afectar diferentes zonas de una presa, generando, a su vez, daños distintos.

La literatura científica ofrece, al ingeniero responsable de la explotación, gran número de medidas correctoras, todas con considerables ventajas técnicas, y algunas, además, con considerables ventajas económicas. La obligación del ingeniero es, cuando se presenta un nuevo problema, dirimir cual es la más aconsejable.

La intención de este texto es presentar, de forma conjunta y sucinta, las distintas opciones con que se pueden mitigar o afrontar las expansiones de hormigón, si bien es cierto que el juicio definitivo a realizar a estas técnicas aún hoy no se podrá efectuar de manera concluyente, pues muchas de ellas necesitan ser analizadas con la perspectiva temporal que darán el paso de los decenios. Aún así, se presentan, en el texto que sigue, una serie de elementos objetivos que permiten al lector confeccionar una opinión inicial sobre las ventajas y los inconvenientes que estas medidas correctoras conllevan.

En la parte final del capítulo se presentan una serie de consideraciones para afrontar las posibles reacciones expansivas del hormigón de presas en construcción.

5.2.- TRATAMIENTO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES

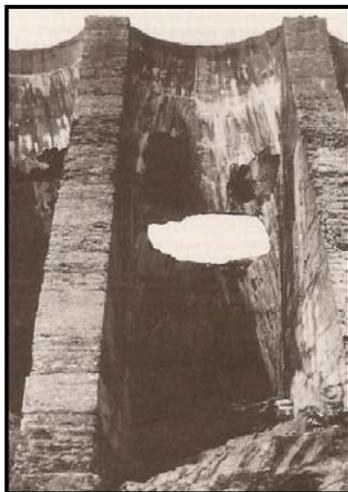
La patología expansiva que puede padecer una presa puede abordarse desde 3 ópticas muy distintas. En primer lugar, los responsables de la presa pueden plantearse actuaciones que intenten frenar la reacción química causante de la problemática, también se pueden plantear el corregir los problemas causados por la expansión, sin descartar, evidentemente, combinar ambas filosofías de trabajo. Finalmente los responsables de la presa pueden plantearse no realizar ningún tipo de actuación, es decir actuar de manera pasiva delante de la reacción expansiva, bien porque la presa presente un estado tal de deterioro que desaconseje su reparación, bien porque se estime que la reacción expansiva es inofensiva.

El texto que sigue va a detallar estas tres filosofías de trabajo con las distintas tipologías de actuación conocidas para cada una de ellas.

5.2.1.- Medidas pasivas frente a la expansión del hormigón

5.2.1.1.- Abandono de la presa

En un paradigma como el actual, donde muchos conceptos se aplican sin conocimiento de causa, es difícil asumir algunas medidas por lo impopulares que pueden llegar a resultar. Hoy, en la sociedad civil son moda conceptos como reciclaje y ahorro, conceptos que en algunos casos son totalmente antónimos a largo plazo. Algunas de las presas afectadas por reacciones expansivas, bien por la virulencia del ataque químico, bien por el tiempo que este lleva desarrollándose, se encuentran o se encontraban en estados de mantenimiento deplorables.



*Figura 5.1- Imagen del arco roto de Fonsagrada
(Guerreiro et al., 1991)*

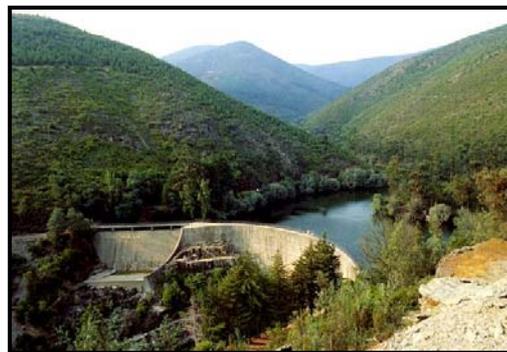


Figura 5.2- Alto Ceira abandonada

Después de minuciosos estudios de análisis de la viabilidad de las medidas a adoptar, algunas de las presas del panorama mundial han sido abandonadas, pues resultaba inviable técnica y económicamente su reparación. Son ejemplo de presas de hormigón con expansiones abandonadas: Alto Ceira (Portugal), American Falls (EEUU), Arlas (Suiza) o Fonsagrada (España).

Normalmente el abandono de una de estas presas no responde a la falta de voluntad de invertir en el sector, pues en la mayoría de casos el abandono de estas estructuras a significado la construcción de una presa aguas abajo. Evidentemente el impacto ambiental y económico que representa la construcción de una nueva estructura es muy superior al que representa la rehabilitación de la ya existente, pero en muchos de los casos en que se ha decidió realizar una nueva construcción, la decisión responde al hecho que la inversión en la rehabilitación no aseguraba unos resultados significativos en la paliación de la expansión del hormigón con lo cual una gran inversión para recuperar a una estructura en estado precario podía caer en saco roto, al ser muy probable la reproducción de las reacciones expansivas.

En el caso de la presa de Fonsagrada el 3 de marzo de 1987 se produjo la rotura de uno de los arcos, dejando un hueco de 7 m² entre dos juntas de construcción. Esta era una presa que no disponía de instrumentación por lo que hasta que se produjo la rotura no se sospechaba la presencia de expansión en el hormigón. Al plantearse la reparación, se llegó a la conclusión que sólo podría utilizarse la parte baja de los arcos, si, previa monotorización, se impermeabilizaba aguas arriba, cosa que ya se había intentado años antes con paupérrimos resultados, por lo que finalmente se decidió abandonarla.

Distinto fue el caso de Alto Ceira. La presa portuguesa si contaba con una buena instrumentación, y fue esta la que permitió detectar un comportamiento anómalo, caracterizado por la existencia de desplazamientos horizontales hacia aguas arriba y verticales ascendentes. Asumiendo continuidad estructural se calculó una expansión de $1600 \cdot 10^{-6}$ microstrains. Simultáneamente, se desarrolló una fisuración de carácter estructural de gran importancia. Se decidió abandonar la presa como consecuencia del alto coste que suponía la reparación.

5.2.1.2.- Ausencia de actuación

Las reacciones expansivas pueden dividirse en tres grandes fases temporales:

- Activación: el proceso de degradación del hormigón comienza y avanza de manera pausada.
- Desarrollo: la patología evoluciona activamente y se producen los máximos gradientes de expansión.
- Desactivación: el proceso de degradación se reduce gradualmente, tendiendo a su estabilización

El estudio del fenómeno expansivo en las presas de hormigón viene motivado, sin lugar a duda, por la necesidad de evitar daños a la sociedad causados por una posible rotura de la estructura.

En algunos casos, los responsables de las presas han detectado el fenómeno expansivo en la fase de desaceleración. Si la presa no presenta daños estructurales que comprometan su funcionamiento carece de sentido actuar sobre un proceso que está expirando. La única intervención que podría tener sentido en este caso sería aquella que sirviera para mejorar la imagen de la presa, que serviría en caso de estar deteriorada visualmente, para tranquilizar a todos aquellos que habitan en los alrededores de la presa.

El gran problema que se le presenta al ingeniero es dirimir si la presa está o no en fase de desactivación. Si el proceso expansivo sigue avanzando de manera veloz y no se toman medidas correctoras adecuadas, en el momento justo, pensando que el deterioro estructural de la presa tiende a estabilizarse, puede que esto traiga consecuencias no deseables.

Larive (1998) desarrolló un modelo analítico para la evolución de las deformaciones del hormigón debidas a reacciones RAA basado en la termodinámica de las reacciones, y lo calibró con numerosos datos experimentales. Dicho modelo define el tiempo de latencia (τ_L) y el tiempo característico (τ_C) que se muestran en la figura 5.3, para la evolución en el tiempo de una expansión unitaria. El primero es el punto de inflexión de la curva y se considera el tiempo asociado a la disolución de sílice activa. El segundo es el tiempo definido entre el punto de inflexión y la intersección de la recta tangente a la curva en el punto de inflexión con el valor de la asíntota de expansión final; este tiempo está asociado con los productos de formación de la reacción. A partir de este trabajo, distintos autores han empleado variantes de dicho modelo de comportamiento material en un análisis numérico estructural. Para el caso específico de presas de hormigón se puede citar Saouma y Perotti (2006) entre otros.

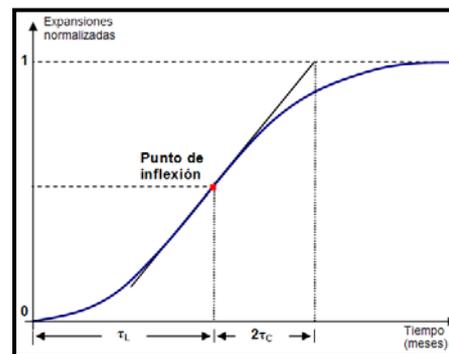


Figura 5.3- Tiempo de latencia y tiempo característico (Larive, 1998)

En esta línea y con la intención de estudiar los movimientos remanentes de alineación observados en coronación de presas de gravedad afectadas por reacciones sulfáticas internas, se presenta un modelo matemático definido por Aguado *et al.* (1998), donde se propone una función exponencial, similar a las ecuaciones que controlan la cinética de las expansiones del hormigón, del tipo:

$$y = A + B \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{c}\right)^p} \right) \quad (5.1)$$

- donde:
- A = valor de la ordenada en el origen.
 - B = rango de variación de la curva en ordenadas.
 - t = tiempo.
 - C = valor de la abscisa para el cual se produce el punto de inflexión en caso de curvas con valores de p mayor que 1.
 - p = parámetro que da la forma de la curva.

El coeficiente A permite estimar los movimientos ocurridos cuando el sistema de auscultación se instala con posterioridad a la puesta en servicio de la presa (por ejemplo en

la presa de Graus que se analiza luego), B es el máximo movimiento previsto y C es el tiempo a partir del cual se reduce el gradiente de los movimientos.

La función exponencial 5.1 ha sido aplicada a casos reales, Araújo *et al.* (2008a), su validez es verificada en las presas de Graus y Tavascán cuyos historiales de mediciones son bastante extensos, más de 400 meses. Dichas estructuras presentan problemas de expansión interna del hormigón debido a la alteración de los sulfuros de hierro en forma de pirrotina existentes en el árido empleado en la mezcla. A través de los métodos de los mínimos cuadrados, la función 5.1 fue ajustada para la obtención de los parámetros requeridos para distintos tiempos de estabilización del proceso. El análisis de los resultados concluyó que, de las diversas curvas ajustadas, la que mejor ha representado los movimientos es la que tiene el punto de inflexión alrededor de los 350 meses. En las figuras 5.4 y 5.5 se presentan los movimientos reales medidos (en línea continua) y las respectivas curvas de 350 meses ajustadas (líneas discontinuas). Tal como se puede observar, las curvas graficadas representan muy satisfactoriamente los desplazamientos horizontales observados en coronación de ambas presas analizadas. Además de los tiempos de estabilización de los movimientos remanentes, el modelo matemático permite predecir un orden de magnitud para los movimientos máximos esperados. La ventaja de este tipo de función es que representa tanto los movimientos observados en las estructuras como la tendencia exponencial de las ecuaciones que controlan la expansión del hormigón. Estas figuras ponen de manifiesto, también, que la evolución de los movimientos registrados tiende a la estabilización del fenómeno expansivo.

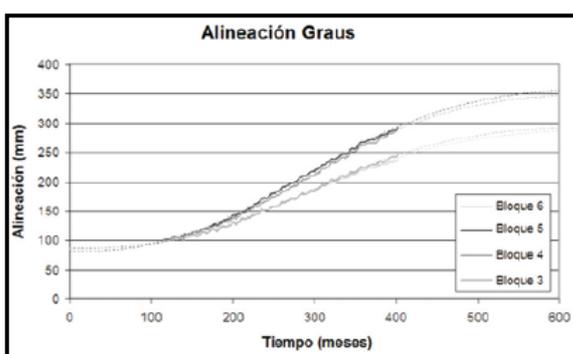


Figura 5.4- movimientos de Graus
(Araújo *et al.*, 2008a)

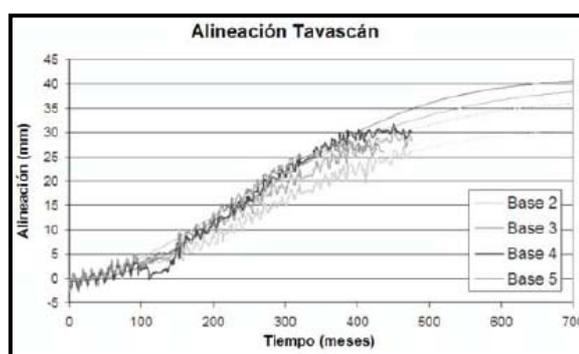


Figura 5.5- movimientos de Tabescán
(Araújo *et al.*, 2008a)

Al aplicar este modelo a presas afectadas por la presencia de álcalis se ha visto que, aunque la forma de evolución de los desplazamientos sea similar al de las presas con RS, todo indica que la cinética es más lenta con puntos de inflexión más altos.

5.2.1.2.1.- Gene Wash

Uno de los casos más claros que existen a nivel internacional de estabilización del proceso expansivos, donde no se realizó ninguna actuación, es la presa de Gene Wash, situada en EE.UU., una estructura de arco bóveda de 40 metros de altura finalizada en 1937 afectada por una reacción álcali-sílice.

En esta presa se detectaron deformaciones horizontales y verticales, el movimiento horizontal se registró de forma discontinua y se observó que entre 1945 y 1964 se detuvo y

sólo se observaban los desplazamientos estacionales. El desplazamiento acumulado fue de 106 mm. Los movimientos verticales se cuantificaron en 90 mm en el periodo entre 1942 y 1965 mientras que entre 1965 y 1995, sólo se dieron 8 mm, Hill (1995).

Se apreció fisuración extensiva y numerosas fisuras de anchura y extensión considerables. La fisuración en mapa estaba más presente en la parte externa y está asociada a los ciclos humedad – secado y relacionada con la dilatación de la masa de la presa. Las fisuras mayores estaban asociadas a las discontinuidades en la roca de los estribos.

Todas las deformaciones se desarrollaron rápidamente en los primeros años de la vida de la presa y la velocidad disminuyó asintóticamente hasta prácticamente anularse en los últimos 50 años.

5.2.1.3.- Reparaciones Superficiales

Probablemente este tipo de tratamiento merecería estar clasificado en un grupo especial, independiente de los demás. Realizar una reparación superficial significa actuar sobre la presa, pero no se ataca a los fenómenos causantes de la expansión ni tampoco se pretende reducir las consecuencias que de ella se desprenden.

Este tipo de intervención permite resanar la imagen exterior de la presa, y así conseguir que ésta sea la idónea, generando un clima de tranquilidad en la sociedad que convive con la presa en cuestión.

Normalmente lo que se realiza es una imprimación de los paramentos de la presa, no confundir con impermeabilizarlos. La imprimación consiste en aplicar una capa de material, normalmente una pintura que permite tapar los signos de deterioro de la expansión de la presa, dando un acabado semejante al que se consigue con una impermeabilización.

En alguna presa se plantea la posibilidad de cambiar el hormigón degradado por la reacción expansiva por otro de sano. Aunque este tipo de actuaciones se plantean con frecuencia, en muchos casos se desestima. En la presa Rincón de Baygorria, situada en Uruguay, afectada por una reacción álcali-sílice se planteó la opción de substituir el hormigón de la cuarta etapa del cono, pues se observó que la remoción completa de este hormigón, constituía una alternativa que podría resolver el problema. Si la reacción álcali-sílice involucraba a toda esta fase y las demás no eran reactivas, la demolición de este hormigón y su sustitución por otro no reactivo conformaba una alternativa posible. No obstante, tal intervención que incluía, necesariamente, el desmonte de las turbinas implicaba la interrupción de la explotación de la presa por un periodo prolongado con el cese consecuente de ingresos, pérdidas que superaban con creces el coste directo de la obra. El inconveniente económico sumado al hecho que no se garantizaba la solución del problema expansivo hizo que se desestimara esta operación. Finalmente sólo se cambió el anillo inferior del distribuidor de la turbina, al ser la pieza que más había padecido las consecuencias de la expansión.

Hay varios ejemplos donde si se ha llevado a cabo este tipo de actuación, pero todos con resultados pésimos, Chelsea, Coniston y Maentwrog necesitaron realizar nuevos

tratamientos poco tiempo después de haber cambiado parte de su hormigón afectado pues la situación de la presa volvía a ser preocupante.

5.2.2.- Actuaciones dirigidas a frenar la expansión del hormigón

5.2.2.1.- Impermeabilizar

La naturaleza de las reacciones expansivas exige la presencia de agua para que estas se desarrollen y, en consecuencia, causen el deterioro del hormigón. Las primeras medidas adoptadas para solventar esta patología se dirigían precisamente a evitar la presencia de agua en el interior del hormigón.

Con tal intención, normalmente, se realizaba, y se realiza, un tratamiento de impermeabilización del paramento aguas arriba de la presa, el principio usado, generalmente, es la colocación de una capa que tiende a evitar el contacto entre el hormigón de la presa y el agua.

La capa impermeabilizante puede ser de varios materiales, y su colocación puede realizarse según diversas técnicas. La experiencia, pero, nos dice, hoy, que las membranas más válidas para impermeabilizar presas de hormigón con expansiones son las geomembranas.

El uso de geomembranas de baja permeabilidad para la reparación del paramento de aguas arriba de presas de hormigón se inició a principios de los años 60, la primera presa donde se aplicó esta técnica fue la presa de Terzaghi, conocida así en honor al famoso Ingeniero Civil, siendo pero la década de los setenta la de la irrupción definitiva de esta técnica. En los primeros años era el PVC el material escogido para realizar la tarea de impermeabilización, con espesores que generalmente solían oscilar alrededor de los 2-3 mm.

En instalaciones posteriores el sistema se ha ido perfeccionando gradualmente. Por ejemplo, en la década de los 80, en lugar del original geomembrana de PVC, se pasó a utilizar un geocompuesto alcanzado por un acoplamiento en caliente con un geotextil de PET (poliéster). El geotextil así concebido crea un estrato antipunzante, que permitía reducir al mínimo el tiempo que solía ser necesario de preparación de la superficie del paramento de montaña antes de la instalación del producto geosintético, y también aumentaba la estabilidad dimensional de la propia lámina. La capacidad drenante del geotextil, de espesor idéntico a los de PVC permite el flujo del agua, del interior al exterior a través del plano del paramento de aguas arriba: esta propiedad está relacionada con el concepto de proporcionar un drenaje para el agua presente en la parte posterior de la geomembrana, y, en particular en el cuerpo de la presa, algo que los proyectistas que participan en estas acciones consideran fundamental para un buen rendimiento a largo plazo de todo el sistema.

Desde 1990 hasta la fecha la técnica ha sido objeto de nuevas evoluciones, por ejemplo la utilización de un nuevo material de transición, con un elevado espesor y con una notable resistencia al punzamiento, permitió instalar la geomembrana en paredes irregulares, sin un ajuste previo de la superficie.

En todas estas aplicaciones aguas arriba de las presas es importantísimo controlar el estado de las geomembranas, estudiando su comportamiento en el tiempo pues pueden estar sujetas a un rápido envejecimiento causado por factores ambientales.

Para verificar el comportamiento en el tiempo de este sistema es necesario tomar a intervalos regulares, varias muestras de la geomembrana y someterlas a pruebas físicas y mecánicas para controlar así la evolución de sus propiedades.

Es necesario mencionar en este texto que se pueden encontrar membranas impermeabilizadoras de otro tipo de materiales, ICOLD (1997). Por ejemplo se puede colocar una nueva capa de hormigón aguas arriba fijada con barras de acero. El grosor será variable en función del método de fijación, las cargas impuestas, la durabilidad y la impermeabilidad deseadas.

También existe la posibilidad de realizar revestimientos superficiales que consisten en la aplicación de membranas o capas bituminosas que pueden proporcionar protección por un periodo que puede oscilar entre los 5 y los 10 años. Los revestimientos pueden estar basados en emulsiones fenólicas o en emulsiones acuosas. En este caso, un requerimiento muy importante es que se lleven a cabo los trabajos en un tiempo seco y con una superficie limpia y preparada convenientemente mediante chorro de agua o herramientas mecánicas. Los revestimientos que se pueden reforzar con fibras de vidrio son mucho más caros, pero permiten incrementar la vida útil hasta los 20 años. En este caso, se debe preparar la superficie muy bien, decapándola por abrasión para evitar la contaminación de la primera capa del hormigón y tener muy presente las compatibilidades entre el revestimiento y el paramento.

5.2.2.1.1.- La impermeabilización de San Esteban

La Presa de San Esteban, situada en el río Sil, en el término municipal de Nogueira de Ramuín (Orense), es una presa de arco-gravedad con un único radio de curvatura de 120m y una altura de 115m. San Esteban, propiedad de Iberdrola, se inauguró en el año 1956.

La presa está dividida en 17 bloques y la recorren longitudinalmente tres galerías principales, dos de las cuales tiene salida al exterior a través de los ramales transversales. La cimentación está constituida por gneis graníticos y como accidentes relevantes aparecen: un dique de diabasa casi vertical en el estribo derecho, sensiblemente normal al arco de la presa, y otro de aplita, perpendicular al río, que buza ligeramente hacia aguas abajo.

A principios de la década de los ochenta, los responsables de la presa observan que la estructura tiene un comportamiento anómalo. Los registros de los sistemas de auscultación denotan que la presa se mueve en dirección aguas arriba, ver figura 5.6. Un movimiento que es mayor en el margen derecho, y que se cifra en casi 1 mm/año. Además aparecen filtraciones de agua, nada despreciables. A todo esto, se sumaba el deterioro visible de los paramentos con humedades, sobre todo en su parte superior derecha, donde se podían observar, además, numerosas fisuras.

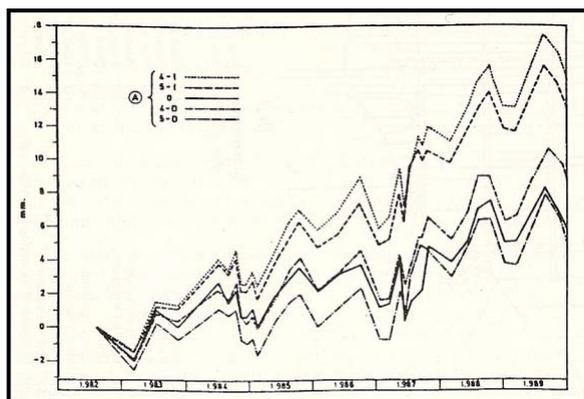


Figura 5.6- Registros de los sistemas de auscultación (Gil y Cajete, 1991)

Vista la sintomatología se autorizó un estudio del hormigón de la estructura, concluyéndose, que la problemática era causada por una reacción álcali-sílice.

Teniendo en cuenta la situación en que se encontraba la presa se decidió llevar a cabo unas labores de reparación que tuvieron lugar en el paramento, juntas radiales, retomas y fisuras, ver figura 5.7.

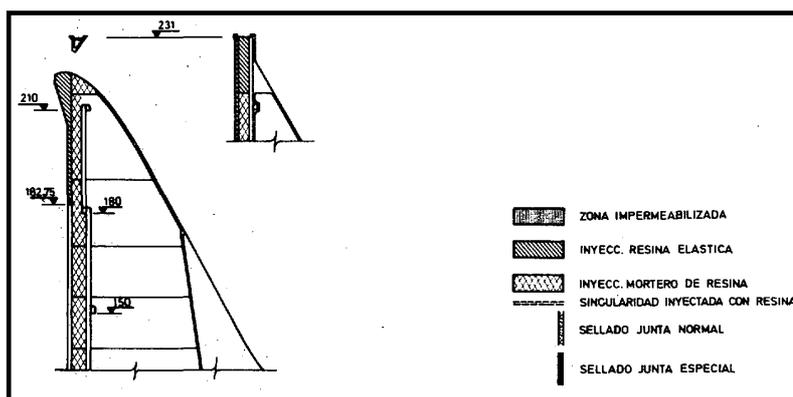


Figura 5.7- Esquema del tratamiento realizado en San Esteban (Gil y Cajete, 1991)

La impermeabilización del paramento que se realizó en el verano de 1987, trató la pared solamente en sus 50 metros superiores, ver figura 5.8. La impermeabilización se realizó con un sistema adherido al paramento de 5 mm de espesor total, basado en un laminado integrado por resina epoxi combinada con un refuerzo que estaba constituido por un conglomerado de fibras de vidrio sin orientación preferente y unidas entre sí.

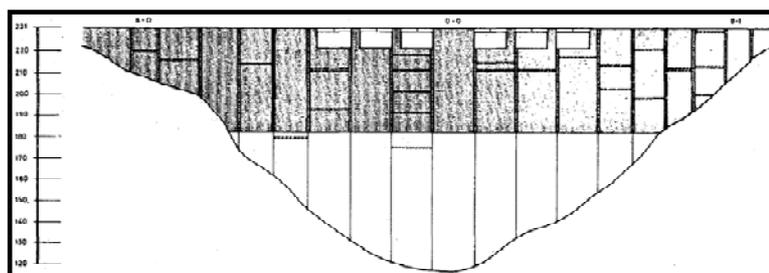


Figura 5.8- Zona impermeabilizada (Gil y Cajete, 1991)

Los resultados de los trabajos se consideraron altamente satisfactorios. Después de la intervención no se observaban humedades en el paramento de aguas abajo y, además, las filtraciones interiores en el cuerpo de la presa se habían reducido en un 98%. El gran problema de la reparación fue que poco después de la misma los movimientos seguían produciéndose.



Figura 5.9.- Estado actual del paramento impermeabilizado en San Esteban

5.2.2.2.- Tratamiento de fisuras

Las presas de hormigón con expansiones padecen en muchos casos un grado de fisuración considerablemente elevado. La fisuración, uno de los síntomas más evidentes de la expansión, como se ha especificado en el capítulo anterior, tiene que ser tratada con extremo cuidado al ser uno de los focos de avance la reacción expansiva.

Normalmente en los trabajos de rehabilitación de una presa suele combinarse la instalación de una capa impermeable con la reparación de las fisuras, como queda constatado en el anejo 1 de esta tesina. El protagonismo de la intervención correctora, sin embargo, suele recaer únicamente en la impermeabilización, esta, pero, perdería eficiencia sin el previo proceso de inyección y sellado de las fisuras. De todas formas, en algunos casos, Asejire (Nigeria), Churchill (Sudáfrica) o Corfino (Italia), los responsables también han optado por actuar solamente sobre las fisuras.

Para poder afrontar la reparación de una fisura o de un conjunto de fisuras aparecidas en el hormigón de una presa es esencial realizar un estudio detallado de las mismas, como se ha presentado en el capítulo anterior, con el fin de determinar una serie de conceptos que se intuyen primordiales en la toma de decisiones.

Dependiendo de la magnitud, y sobre todo de las causas de la fisuración, son muchos los objetivos que se pueden pretender conseguir mediante la reparación de las hendiduras del hormigón.

Las fisuras solo se podrán reparar correctamente, si las causas son conocidas y si los métodos de reparación son adecuados a dichas causas. Los procedimientos óptimos de

reparación, a largo plazo, son aquellos que atacan las causas de las fisuras además de corregir las propias hendiduras.

Para que se pueda producir la reacción expansiva, como se ha explicado al inicio de este texto es, necesario que el agua actúe en la reacción. Si la presa dispone de fisuras, estas son unas vías perfectas para que el agua se desplace en su interior y así entre en contacto con los áridos. Esto significa que se potencia la reacción expansiva. Para mitigar esta reacción lo primero que hay que hacer es impedir que el agua se escuele.

Antes de entrar en el detalle de los métodos principales de intervención, remarcar que la gran dificultad de estos se presenta por el hecho que la presa debe ser reparada mientras está en servicio, algo que no sucede en gran parte de las otras obras civiles.

En este texto se presentarán tres grandes sistemas de reparación de fisuras: las resinas epoxi (uno de los materiales más comúnmente usados para inyectar y sellar las fisuras que aparecen en las presas), el llenado con resina de uretanos y el tradicional llenado con mortero de cemento.

5.2.2.2.1.- Inyección de resinas epoxi

Los compuestos de resinas epoxídicas han tenido amplia aceptación y su uso se ha extendido a las actividades en que se requiere un polímero de alta resistencia mecánica. Son materiales termofraguables que se tornan duros mediante la acción de agentes actuantes.

Los compuestos epoxi son un grupo de éteres cíclicos que son óxidos de alkeno que poseen un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono adyacentes. Estos etares reaccionan con los grupos amino, oxhidrilo y carboxilo (endurecedores), así como con los ácidos inorgánicos para dar compuestos relativamente estables, Coderch (1999).

Un endurecedor o agente de curado es un producto químico puro, una mezcla, o un polímero complejo que, cuando se añade a una sustancia macromolecular determinada en cantidades superiores a las catalíticas, reacciona con ésta y la convierte en un polímero irreversible que poseerá una serie de características perfectamente definidas, de las que antes carecía.

Las resinas, por si solas, no presentan ninguna propiedad técnica útil hasta que son endurecidas mediante reacciones químicas de doble enlace provocadas por el agente de curado. Su estructura química ha de ser transformada en una red tridimensional constituida por enlaces covalentes en todas las direcciones para conseguir las características deseadas en las resinas.

Gracias a las resinas epoxi, obtenidas mediante el método antes expuesto, se pueden cerrar hendiduras de pequeño tamaño, hasta 0,05 mm, de presas y de otro tipo de estructuras de hormigón, ACI (1998). No obstante, como ya se ha dicho, al no atacar el problema original es probable que aparezcan nuevas fisuras una vez finalizada la operación de saneo de la presa.

Aplicar esta técnica no es sencillo se necesita gran cantidad de resina por lo que es complicado que se pueda realizar la inyección en una sola operación, como es el caso de otras obras de edificación. Las fases de esta operación son ACI (1998):

- Limpiar las fisuras

El primer paso consiste en limpiar las fisuras en la medida de lo posible. Los contaminantes (polvo, partículas finas del hormigón...) impiden la penetración y la adherencia de la resina epoxi, reduciendo la eficiencia de la reparación que se lleva a cabo. La sustracción de los contaminantes normalmente se realiza por aspiración o lavado. Si se usa este segundo método se debe eliminar el fluido usado para tal menester mediante aire comprimido o un agente neutralizante. Es importante reconocer las limitaciones prácticas que impiden limpiar adecuadamente la fisura.

- Sellar superficie

Las fisuras superficiales deben sellarse para evitar que el material epoxídico salga antes de que se produzca su gelificación. Esto no sería un problema si no fuera porque el material epoxídico saliente de la zona de la fisura, a causa de un mal sellado, puede llegar a obturar los drenes. El poliéster es uno de los materiales clásicos usados como sellador, pero también se usan selladores superficiales plásticos si no se requiere una alta presión de sellado.

- Instalar las bocas de entrada y venteo

Existen dos métodos generalizados para este tipo de trabajos: accesorios insertados en orificios perforados y accesorios adheridos a ras, dependiendo generalmente de si el perfilado de las fisuras es en forma de V o no.

Los accesorios insertados en orificios perforados fueron el primer método utilizado y consiste en realizar una perforación de unos 20 mm de diámetro, situado debajo de la acanaladura en forma de V. Normalmente se coloca una boquilla de tubería como accesorio. Por su parte, los accesorios adheridos a ras, usados tendencialmente cuando la fisura no es en forma de V, se colocan en la cara de hormigón sobre la fisura. Este accesorio tiene una abertura en su parte superior para permitir el acceso del adhesivo.

- Mezclar la resina epoxi

Existen dos métodos de mezcla, el denominado por pastones y el conocido con el nombre de método continuo. En el mezclado por pastones, los componentes adhesivos se mezclan previamente según lo establecido por el fabricante del producto. Cuando el material comienza a gelificar sus características de flujo empiezan a modificarse, dificultando la inyección a presión de manera considerable. Por lo expuesto es necesario mezclar solamente el material adhesivo que se vaya a utilizar antes de que empiece la gelificación. El método continuo se usa para poder utilizar adhesivos que tienen una vida útil extremadamente reducida. Los adhesivos líquidos pasan, en este segundo método, a través de las bombas de dosificación antes de pasar por un mezclador automático.

- Inyectar la resina epoxi

Son varios los instrumentos que se pueden utilizar para realizar este paso, pero normalmente se usan las pistolas neumáticas o las bombas hidráulicas. Determinar la presión justa de inyección es un detalle muy importante, una presión excesivamente baja evitaría que se llenara la totalidad de la fisura, y por el contrario, una presión excesivamente alta podría llegar a aumentar la fisura que se pretende reparar.

La inyección de la resina no es igual para las hendiduras horizontales que para las verticales o tendencialmente verticales. Si la fisura que hay que reparar es horizontal, la inyección debería proceder de la misma manera de un extremo de la fisura hasta el otro. Se dará por finalizada la reparación de esa fisura en el momento en que la presión sea constante, pues si esto no sucede pueden ocurrir dos cosas, que la resina aun fluya hacia una zona que no está ocupada o bien que exista una fuga. Si la fisura es vertical, el proceso debe iniciarse desde la parte más baja, inyectando resina desde esta entrada hasta la que se encuentre inmediatamente por encima de esta. En este punto se obtura la entrada inferior y se repite el proceso desde el punto actual. Esto se va realizando hasta completar toda la fisura.

- Retirar el sellado superficial

Una vez la resina se ha curado y se asegura que su funcionamiento es el previsto, se retira el sellado superficial, normalmente se hace por trituración.

5.2.2.2.- Inyección con resinas de uretanos

Los uretanos son una clase de compuestos que tienen en común el grupo carbamato, figura 5.10, y son, por lo tanto, formalmente derivados del ácido carbámico. Se forman fácilmente en la reacción del cianato ($R-N=C=O$) correspondiente con el alcohol $R'OH$.

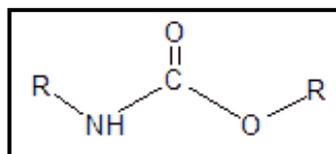


Figura 5.10- esquema del grupo carbamato

De todos los uretanos existentes aquellos que se usan como inyectables tienen la capacidad de expandirse después de ser inyectados hasta ocupar prácticamente el 100% de los espacios vacíos de confinamiento, lo que les permite formar barreras sellantes e impermeables, esta característica les permite inclusive conseguir alta resistencia.

El uso de distintos productos en el proceso de curado hace que se obtengan uretanos con propiedades distintas. Los radicales hidróxilo de los endurecedores hacen que se generen cambios en los radicales de la estructura química de los uretanos originales, creando, así, moléculas lineales y ramificadas. Una de las principales ventajas de estas

resinas es la sencillez de su aplicación, pudiéndose aplicar en hendiduras de tamaños mínimos iguales a las curadas por resinas epoxi.

Los uretanos son inyectados por medio de bombas manuales, eléctricas o neumáticas. Gracias a su reactividad con el agua, los uretanos fueron concebidos para impermeabilizar. Cuando se realiza el contacto uretano-agua se da la reacción del uretano que forma una barrera impermeable que detiene cualquier infiltración de agua.

Existen dos grandes grupos de uretanos, hidrofóbicos y hidrofílicos. Teniendo en cuenta el área de estudio de esta tesina, donde la superficie circundante se encuentra alternativamente seca y húmeda, las resinas ideales son las de uretanos hidrofóbicos. Estas resinas requieren de una cantidad mínima de agua. La gran ventaja que presentan estas resinas es que no se ven afectadas por un exceso de agua, pues la reacción es estequiométrica, o lo que es lo mismo, solo interviene en el proceso de curado la cantidad necesaria de agua para efectuar la reacción. Estos uretanos, gracias al proceso de curado forman unas masas espumosas con tendencia a compactarse, permitiendo así reparar las fisuras. Además, al ser un tipo de uretanos que contienen un 100% de material sólido, pueden aplicarse a ambientes cambiantes sin la necesidad de padecer cambios de volumen por retracción, que podrían originar la pérdida de la estanquidad de la impermeabilización. Croston *et al.*, (2007). Siendo, pero, su gran hándicap es que se trata de unos productos que tienen un coste elevado en el mercado, por lo que se desestima su uso en operaciones de grandes volúmenes.

5.2.2.2.3.- Llenado con mortero

Las fisuras anchas, con tendencia a aparecer en presas de gravedad con expansiones de hormigón, pueden repararse llenándolas de cemento portland, aunque esto no sirve como ligante estructural entre las secciones agrietadas. En la bibliografía de los últimos años aparece una discusión constante entre los defensores de las inyecciones gruesas y los que se inclinan por las inyecciones delgadas. Los que se deciden por estas últimas piensan que solamente con inyecciones notablemente fluidas 9:1 o 6:1 agua:cemento por volumen (6:1 o 4:1 por peso) la grietas finas en la masa pueden ser penetradas. En cambio los que favorecen las mezclas gruesas tales como 2:1, 1.5:1 o 1:1 agua cemento por volumen (1.3:1, 1:1 o 0.6:1 por peso) se basan en la necesidad de usar mezclas estables, lo que quiere decir una sedimentación del 5% o menos en 2 horas. Este último grupo defiende que solo con este tipo de mezclas se mantienen las propiedades de fluidez de la mezcla pudiéndose realizar una inyección óptima de las grietas. Estos añaden incluso que este último tipo de inyecciones es capaz de resistir, de manera muy considerable, a nuevos ataques químicos.

El proceso a seguir para realizar esta operación no difiere en mucho del presentado para las resinas epoxi. El primer paso es limpiar bien las fisuras, acto seguido hay que instalar unas boquillas de mortero a intervalos sobre la fisura, con el fin de obtener una conexión con el aparato de inyección que soporte la presión. En este punto hay que sellar la fisura correctamente, para lo que se pueden utilizar: un sellador, un mortero o pintura cementicia. Llegado este punto sólo falta llenar toda la zona con el mortero seleccionado. Se debe mantener la presión durante unos minutos para asegurar una buena penetración del mortero, y en consecuencia, para asegurar el éxito de la reparación. Para volúmenes

pequeños se puede usar para la colocación del mortero una pistola de inyección, y en cambio, para volúmenes considerables una bomba.

5.2.2.3.- Tratamiento de las juntas de la presa

En una presa existen dos tipos de juntas: juntas de construcción y juntas de contracción transversal. Las juntas de construcción, llamadas también longitudinales, son generadas por las distintas tongadas de vaciado del hormigón, pues este solo puede depositarse limitado en volumen y altura para reducir la contracción y el agrietamiento después de la construcción. Normalmente encontramos una junta longitudinal cada 1,5 - 2 m.



Figura 5.11- Presa en construcción donde se observan, en rojo, las juntas de bloques y, en azul, las juntas longitudinales. (Pujol, 2008)

Las juntas de contracción transversal o juntas entre bloques se encuentran en intervalos regulares de 15 – 20 m en el eje longitudinal de la presa. Su presencia es necesaria para permitir el movimiento diferencial entre los bloques que ellas definen y así evitar tensiones que pudieran agrietar transversalmente la presa.

Inclusive con la presencia de las juntas debe existir un cierto grado de interacción entre bloques, para permitir una cierta transferencia de cargas de unos a otros. Para favorecer el entrelazado entre bloques se efectúan unos dientes de corte verticales.

El problema aparece cuando la expansión genera la apertura de estas juntas, siendo una de las principales consecuencias la pérdida de la capacidad de los bloques de transmitir las cargas. Además la apertura de estas juntas puede suponer una falta considerable de estanquidad, favoreciéndose las filtraciones.

Existen diversos sistemas para realizar el sellado de estas juntas, operación que se realiza, normalmente, dentro de un contexto de impermeabilización de la presa. Se pueden usar para este tipo de trabajos: mezclas bituminosas, caucho natural, termoplásticos acrílicos, policloruros de vinilo, entre otros productos.

5.2.3.- Actuaciones dirigidas a corregir los problemas derivados de la expansión del hormigón

5.2.3.1.- Instalación de anclajes

Los anclajes son unos elementos estructurales capaces de transmitir una fuerza de tracción a una capa de suelo o de roca. Fue en la década de los 50 cuando empezó a extenderse esta técnica, usada, en los últimos decenios, para combatir problemas estructurales derivados de las reacciones expansivas.

Las presas con hormigones expansivos pueden padecer problemas de estabilidad, debido, por ejemplo, a la fuerza hidrostática ejercida por el agua en su paramento aguas arriba. El anclaje absorbe el momento volcador, generado por el agua, transmitiendo la fuerza de tracción resistente que ejerce a una zona profunda y estable del suelo donde ha sido inyectado, y por tanto con mayor capacidad portante. En estas condiciones, es la resistencia tangencial de la masa de suelo circundante al miembro estructural empotrado quien actúa para resistir dicha carga de tracción.

La continua investigación realizada por las empresas de ingeniería, motivada por las necesidades cada vez más complejas, ha conducido a que el sector disponga de una amplia gama de anclajes diseñados para garantizar el buen funcionamiento de estructuras que por sí solas no garantizan un nivel de seguridad suficiente.

En las presas, los anclajes utilizados son, una tipología específica, de los denominados inyectados. Este tipo de anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados, cementadas mediante inyecciones de lechada de cemento o mortero. El elemento estructural es sometido a tracción, generando un esfuerzo de anclaje el cual es soportado por la resistencia al corte lateral en la zona de inyección en el contacto con el terreno. A través de la inyección, se forma un miembro empotrado en el extremo profundo del tirante metálico colocado dentro del barreno, por lo tanto las fuerzas que actúan sobre el anclaje inyectado no se transmiten en toda la longitud, sino solamente en el tramo de la zona inyectada.

5.2.3.1.1.- Anclajes activos o postesados

Entre los anclajes inyectados encontramos varios tipos, los utilizados mayoritariamente para la reparación de presas con expansiones son los conocidos como anclajes activos o postesados. Estos pueden tener una longitud que, generalmente, puede variar entre los 10 y 80 m y un diámetro de perforación que puede oscilar entre los 75 y 150 mm, Ayala (2006).

Generalmente estos anclajes vienen realizados por unos tirantes constituidos por un haz de hilos o cables. Estos tirantes son capaces de alcanzar tensiones de 3.000 kN si están anclados en rocas, o tensiones que oscilan entre los 1.000 y los 1.500 kN si están anclados en suelos.

Los tirantes se componen de tres partes:

- La cabeza del anclaje que transmite el esfuerzo a la presa
- Una zona libre, aislada del terreno, donde el tirante es capaz de alargarse en función de la tracción.
- La zona de anclaje propiamente dicha, donde se encuentra el bulbo que recubre la armadura y la solidariza al terreno, permitiendo que se le transmitan los esfuerzos.

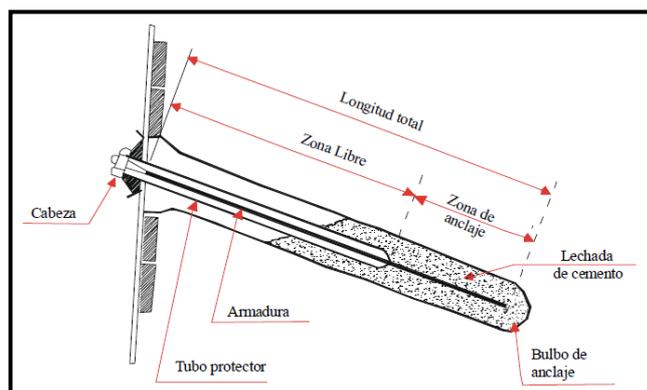


Figura 5.12- Esquema de las partes de un anclaje activo genérico (Ucar, 2005)

Una vez instalado el anclaje activo se pretensa la armadura hasta alcanzar su carga admisible, comprimiendo el terreno entre la zona de anclaje y la placa de apoyo de la cabeza. La placa de apoyo, metálica o de hormigón armado se utiliza para repartir el esfuerzo que transmite el tirante a la presa. Estos anclajes ejercen una acción estabilizadora desde el mismo instante de su puesta en obra, incrementando la resistencia al corte de la masa de suelo. En cambio los pasivos, que sería la otra alternativa, entran en acción cuando se ha iniciado el movimiento, y de ahí que los activos tengan dos apreciables ventajas:

- Aprovechar la resistencia intacta del terreno, por cuanto, el movimiento produce una disminución de las propiedades resistentes.
- Evitar, con el movimiento la rotura del protector contra la corrosión, tan importante en anclajes que pueden trabajar en contacto con agua.

La carga admisible, a la que el texto se refería anteriormente, es igual al producto de la sección de acero por su límite elástico, multiplicado por una coeficiente de seguridad (0,6 para esta tipología). Por lo tanto, al utilizar anclajes permanentes la carga o tracción máxima admisible corresponde a $T_a \leq 0,6 T_g$, siendo T_g la carga que representa el límite elástico considerado el 0,1% de la deformación en el diagrama $\sigma - \varepsilon$, para barras o cables de alta resistencia, y 0,2% para aceros normales. En una forma aproximada $T_g \approx 0,85 F_{pu}$, es decir 85% de la carga de rotura, lo que conlleva a obtener finalmente que $T_a \approx 0,5 F_{pu}$.

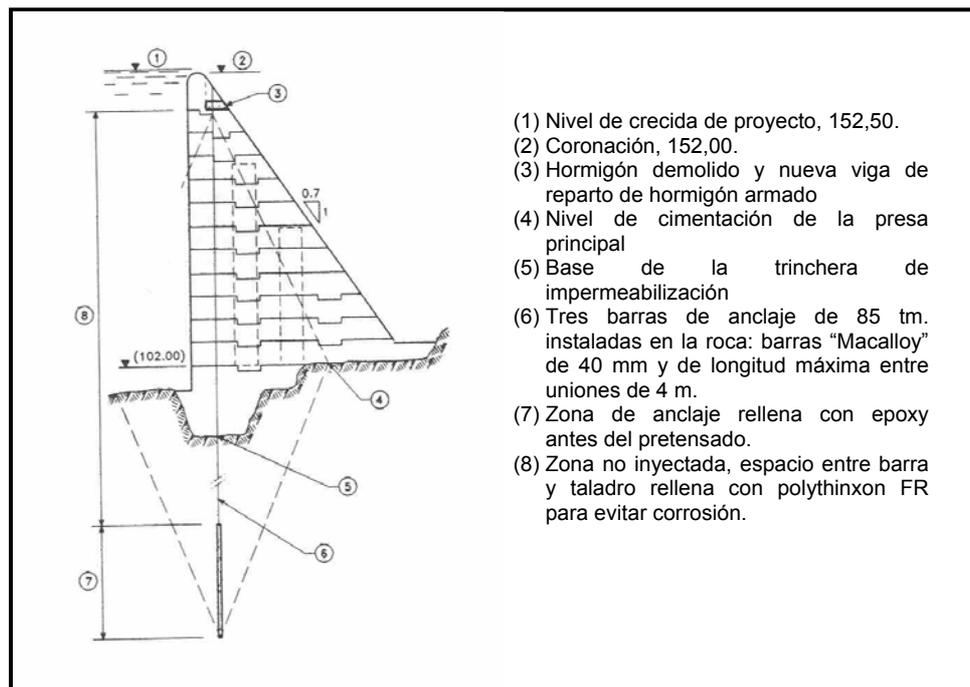


Figura 5.13 Instalación de un anclaje en la presa de Val del Mare (ICOLD, 1991)

5.2.3.1.2.- Protección contra la corrosión

La vida útil de un anclaje está condicionada a los efectos de la corrosión. Un anclaje carente de protección puede ver reducida su vida útil de manera muy considerable. Con la intención de afrontar esta problemática se utiliza una vaina corrugada de protección, además del mortero o lechada de cemento que genera un recubrimiento exterior de 2 a 3 cm, tal y como se indica en las recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes al terreno H.PO. 8-96 redactado por la Asociación Técnica Española de Pretensado.

5.2.3.2.- Refuerzo de hormigón con cambio de sección

Los problemas de estabilidad no sólo pueden solucionarse con la instalación de anclajes, existe la posibilidad de aumentar el peso de la sección de la presa, permitiendo así que se absorban mejor las tracciones que desestabilizan la estructura.

Colocar una nueva masa de hormigón no es trivial, esta debe cumplir dos condiciones antagónicas:

- Su peso deber permitir que se cumplan las condiciones de estabilidad frente al deslizamiento
- La masa debe estar colocada de forma que el reparto de tensiones sea el adecuado, tanto para la condición de embalse lleno como cuando este vacío.

Satisfacer estas dos condiciones no es sencillo, pues la primera exige que alejar la nueva sección del paramento aguas arriba y la segunda aconseja todo lo contrario, es decir acercarlo tanto como sea posible.

5.2.3.2.1.- Mequinenza

Situada en Aragón, con una altura de 77 m. y de tipología gravedad, Mequinenza fue reforzada a finales de los años 70. Hoy es una presa donde se considera que existe expansión de hormigón, pero cabe decir que cuando se realizó el refuerzo mediante sección de hormigón no se había realizado diagnóstico alguno, solamente se tenía la certeza que la cimentación que está formada por una serie de estratos de caliza prácticamente horizontales, con intercalaciones de margas i lignitos. Los lignitos de un espesor de centímetros, con lo que existían planos de inestabilidad por deslizamiento e hinchamiento. Hoy se vuelve a considerar la hipótesis del hinchamiento de lignitos como la causa principal de la patología que padece la presa, Buil, *et al.* (2008)

El refuerzo consistió en realizar una obra prácticamente externa a la presa, con la intención de debilitar lo menos posible los cimientos. Así, la sección que se añadió fue una pieza de hormigón en forma de L, con el lado largo horizontal y el corto vertical e hincado en el terreno (rastrillo).

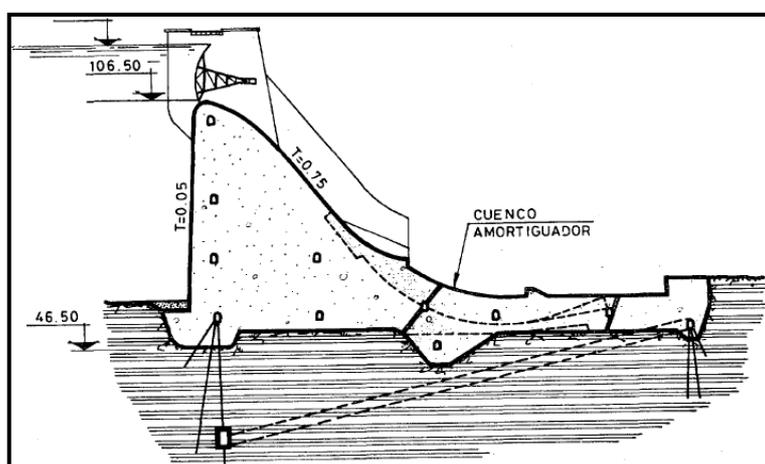


Figura 5.14- Sección de Mequinenza, en línea discontinua la presa sin el refuerzo (Vallarino, 1972).

Es precisamente el trozo vertical, que se inca 8 metros en la cimentación, el que permite que las fuerzas que potencialmente generan el deslizamiento se encuentren con la resistencia que ofrece el terreno y que este trasmite al rastrillo.

Además de hacer esta obra de refuerzo, se perforó una galería longitudinal, paralela a la coronación, a una profundidad de 25 metros, constituyéndose así una obra de drenaje considerable. En la galería se instalaron 6 bombas para garantizar la sustracción de toda el agua filtrada. Finalmente se realizaron galerías tanto en las juntas de construcción de la nueva obra como en el rastrillo.

5.2.3.3.- Corte de hormigón con hilo de diamantes

La expansión del hormigón de una presa conlleva la generación de una serie de tensiones de compresión, sobre todo para presas de eje rectilíneo, a lo largo de su eje longitudinal, que generan una serie de deformaciones en la estructura, dejando en entredicho la seguridad de la presa.

La intervención adoptada en un porcentaje relevante de presas, ver figura 5.15, sobretudo fuera de la península Ibérica, es cortar la estructura en distintos puntos, para consentir la relajación de los esfuerzos de compresión e incluso la recuperación, si bien es cierto que de manera parcial, de las deformaciones.

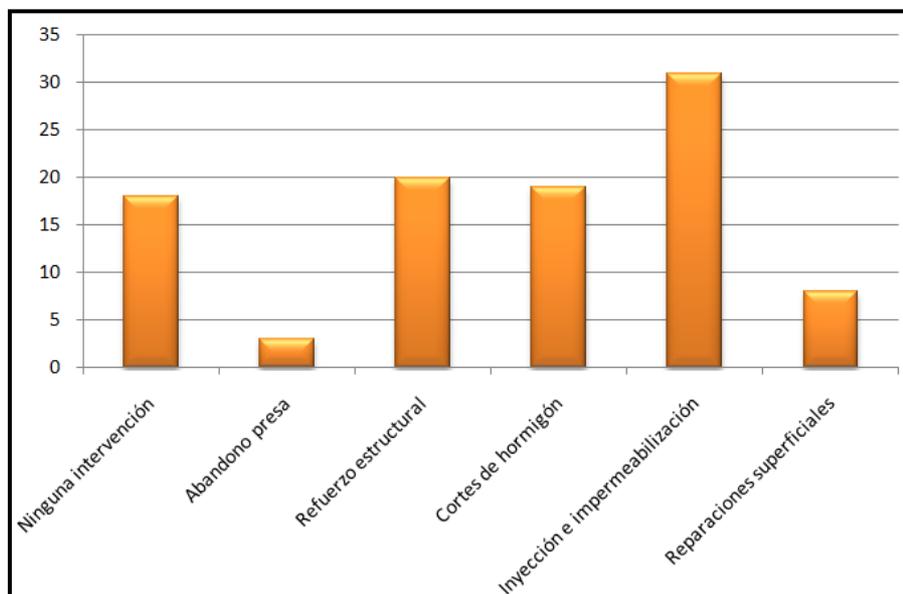


Figura 15: Gráfico resumen del anejo 1. Porcentaje (%) con el que se presentan los distintos tipos de intervención en una presa

El primer caso en que se aplicó esta técnica fue el de la presa de Santeetlah, Estados Unidos, en 1942, solo dos años después de que Stanton hablara de la reacción álcali-árido. Los cortes en el hormigón se realizaron con la técnica conocida como *successive drillings*, Bruce y Masche (1992).

Sucesivamente, la experiencia adquirida en los túneles, para extraer o cortar bloques rocosos, permitió el empleo de esta técnica, también, para el hormigón. La primera presa en que se implementó este sistema de corte fue Chickamauga, también en los Estados Unidos, Newell *et al.* (1997).

La primera actuación realizada fuera de territorio estadounidense fue la que se realizó en Mactaquac, en Canadá. Esta intervención representó un paso muy importante en el sector del corte con hilo diamantado al actuar sobre una presa que padecía una expansión muy violenta de su hormigón.

La técnica del corte de hormigón con hilo de diamante ha podido ser implementada gracias al sumatorio de dos factores: el desarrollo de maquinaria en grado de dar al hilo una velocidad de más de 20 m/s y, sobretudo, en los años 50, el nacimiento de diamantes sintéticos. La sinterización (tratamiento térmico de un compuesto a una temperatura inferior a la de su mezcla de fusión, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas) de diamantes ha permitido obtener óptimos resultados de rendimiento.

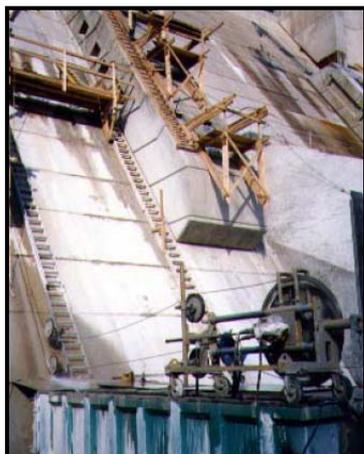


Figura 5.16- Dispositivo técnico necesario para realizar los cortes de hormigón (Marcello et al., 2006)

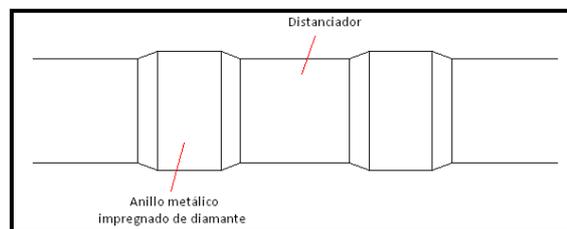


Figura 5.17- Esquema de hilo de diamante

El hilo de diamante usado para cortar es, de hecho, una cuerda de acero, cerrada en anillo donde se encadenan, a intervalos regulares, bolas de acero impregnadas de diamantes. El alambre se envuelve alrededor de la estructura a cortar, una vez colocado se acciona para que trabaje a gran velocidad. La acción combinada de la rotación del alambre y la tracción ejercida, puede cortar materiales muy duros. La eficacia de esta técnica ha permitido extender sus aplicaciones, incluso en el campo de la demolición controlada de obras de ingeniería civil en hormigón armado.

El uso de hilo de diamante tiene, según ICOLD (1991), ciertas ventajas que se pasan a describir a continuación:

- Limitada producción de desechos y de polvo.
- Reducción de ruido.
- Precisión alta, no requiere posterior acabado de las superficies.
- Mayor velocidad de corte.
- Nivel de vibración producido muy bajo, lo que preserva a las estructuras circundantes.
- Se pueden realizar cortes en zonas de difícil acceso (desde cierta distancia) o en estructuras con una configuración especial, respetando al máximo la seguridad y sin la necesidad de modificar la disposición de las instalaciones o equipos.

La expansión del hormigón, puede dar lugar, como se ha explicado anteriormente, a esfuerzos elevados en la estructura: la técnica del corte con hilo de diamante, figuras 5.18 y 5.19, ha sido considerada, por los expertos, como una de las mejores, sino la mejor, de las técnicas, especialmente por las siguientes razones:

- Relajación de esfuerzos
- Apertura y cierre de las articulaciones de las grietas
- Reducción del estado de agrietamiento
- Corrección de deformaciones en órganos electromecánicos
- Recuperación parcial de las deformación acumulada



Figura 5.18- Maquinaria necesaria en coronación para efectuar el corte. (Marcello et al., 2006)



Figura 5.19-. Junta reabierto con un corte (Marcello et al., 2006)

Por otra parte, la producción de juntas en la estructura también permite absorber alguna expansión posterior a la intervención. En muchos casos, sin embargo, es difícil predecir la evolución a corto y largo plazo de los cortes realizados, y esto se debe a diversas cuestiones. Es muy difícil evaluar el esfuerzo inicial en la estructura y las leyes reológicas de descompresión del material cuando existe una superposición de fenómenos ofensivos para el hormigón y para la estructura.

La literatura técnica nos muestra el progresivo uso de esta técnica para tratar casos de expansión en presas de hormigón.

Con la intención de dar un claro ejemplo de esta técnica, y para que no exista confusión, se presentan una serie de casos, bien documentados, a nivel internacional, donde se analiza la situación presentada y el cómo se ha ejecutado el corte con hilo de diamante.

5.2.3.3.1.- Presa de Mactaquac

Es obligatorio analizar, al hablar de la técnica del corte de hormigón, la presa de Mactaquac, figura 5.20, situada en Canadá, pues es una referencia sea por los modelos de cálculo utilizados en el análisis de previsión de expansión, sea por el método utilizado en la realización del corte del hormigón. Es el primer caso estudiado a conciencia, y por esto se ha convertido, con los años en una referencia.

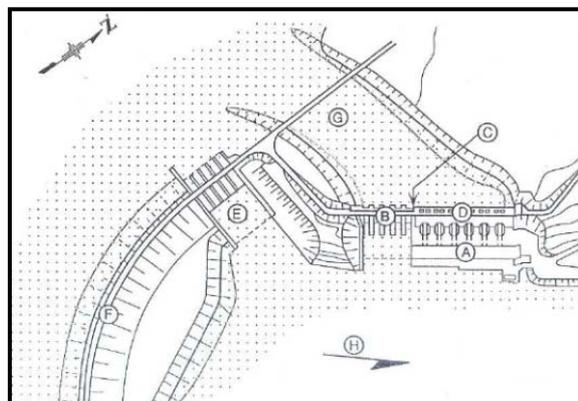


Figura 5.20- Esquema en planta de la presa de Mactaquac (Thompson et al., 1994)

Mactaquac es una presa que se acabó de construir en 1968. A inicio de los años ochenta aparecen los primeros problemas, aparecen las primeras fisuras, pero no es hasta 1985 cuando se tiene la certeza que la presa padece expansión de su hormigón. Se determina que la capacidad expansiva del hormigón es de entre 50 i 150 $\mu\text{m}/\text{año}$. Hayward *et al.* (1991). El diagnóstico conlleva a decidir realizar un programa n de cortes, distribuidos en distintos años, con el fin de recuperar las deformaciones acumuladas en la estructura y relajar los esfuerzos de compresión que esta debe soportar. Se elige el hilo con diamantes para no dañar el pie de presa y para controlar mejor la evolución de los trabajos.

En 1988 se iniciaron los trabajos de rehabilitación de la presa con el corte del hormigón que se encuentra entre las unidades 5-6, figura 5.21, con un hilo de 10 mm de diámetro. El corte se cerró enseguida en 8 mm, pero gracias a esta intervención se recuperaron 4,7 mm de deformación de los 25 mm que se habían medido antes de la intervención y se redujo la compresión medida en 1,5 MPa, es decir se redujo la tensión en un 50%, pues se había medido una tensión de 3,0 MPa.

En 1989 se realiza una segunda campaña de cortes entre las unidades 2-3, 4-5 y 5-6 (se repite el corte realizado un año antes). En esta ocasión el diámetro usado fue de 13 mm. Los resultados obtenidos fueron muy positivos, todos los cortes permanecieron abiertos, estabilizándose la apertura de fisuras y las deformaciones.

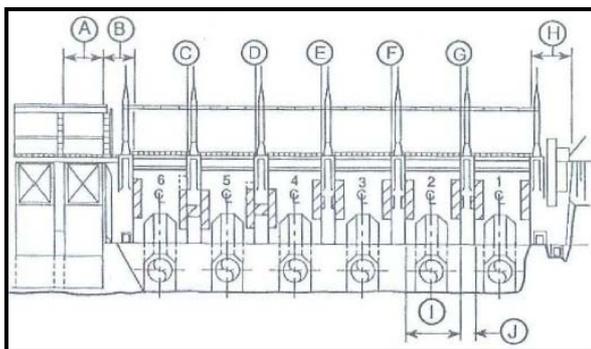


Figura 5.21- Desde aguas abajo, situación de las unidades de la presa (Thompson *et al.*, 1994)

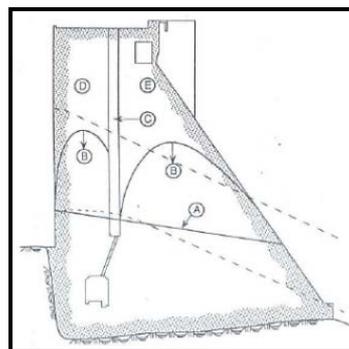


Figura 5.22- Sección transversal del corte realizado(Thompson *et al.*, 1994)

En 1992 se observa que los cortes efectuados en 1989 se estaban cerrando por lo que se realiza una tercera campaña de cortes, esta vez en las unidades 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6. Vista la experiencia de los años precedentes además de realizar el corte se introduce un sistema de impermeabilización para evitar de manera definitiva el cerramiento de los cortes a un plazo reducido. En la figura 5.22 se puede ver un esquema de los cortes, así como también el sistema de impermeabilización, Thompson *et al.* (1994).

Se presentan a continuación tres gráficos donde se puede ver la eficacia de los cortes realizados en esta presa. En la figura 5.23 se presenta los movimientos registrados por los extensómetros entre las unidades 5-6, en la figura 5.24 se muestran los movimientos registrados por un péndulo situado en la pila de la izquierda de la presa y en figura 5.25 se puede observar los esfuerzos medidos en la unidad 6.

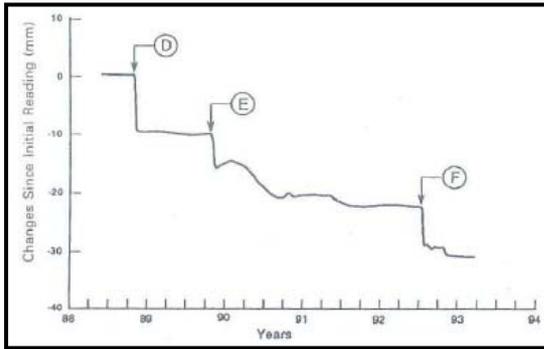


Figura 5.23- Registros de los extensómetros (Thompson et al., 1994)

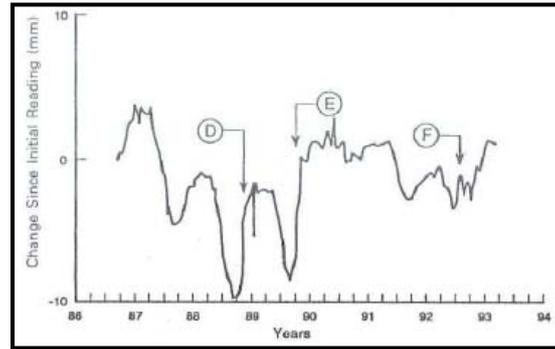


Figura 5.24- Registros de los péndulos (Thompson et al., 1994)

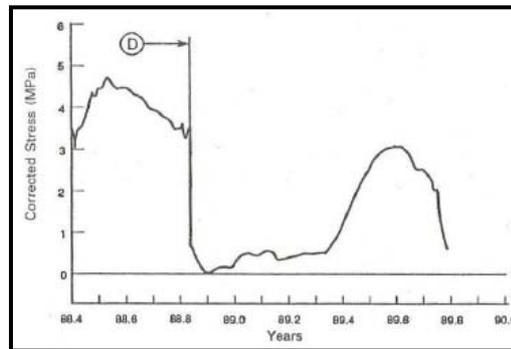


Figura 5.25- Esfuerzos medidos (Thompson et al., 1994)

5.2.3.3.2- Presa de Chambon

En Europa, la presa referencia en el corte de hormigón con hilo de diamante es la presa de Chambon, situada en Francia y construida en 1935. A sus 25 años de edad comenzaron a detectarse una serie de fisuras y a registrarse una serie de movimientos medidos gracias a la instrumentación que poseía la presa, Bourdarot (2006).

La presa no ha dejado de expandirse desde ese momento, esta expansión ha causado que la presa se elevara una magnitud de 3mm/año aproximadamente desde su detección figura 5.26. Además existía un movimiento aguas arriba de 5 mm/año, lo que unido todo hacía necesaria una intervención para detener el fenómeno expansivo o al menos reducir sus consecuencias, figura 5.27. Si bien es cierto que la capacidad expansiva no era de las mayores detectadas, pues oscilaba entre 10 y 80 μ /m/año.

En un primer momento los responsables pensaron en abandonar la presa, y en consecuencia construir una aguas abajo, finalmente por razones económicas se desestimó esa opción y se barajaron múltiples soluciones. Finalmente se decidió realizar una intervención compuesta, basada en tres grandes frentes: inyección de fisuras, impermeabilización del paramento aguas arriba y la ejecución de cortes en el hormigón.

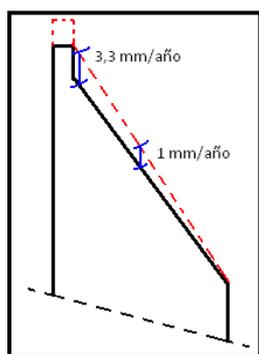


Figura 5.26- Movimientos verticales

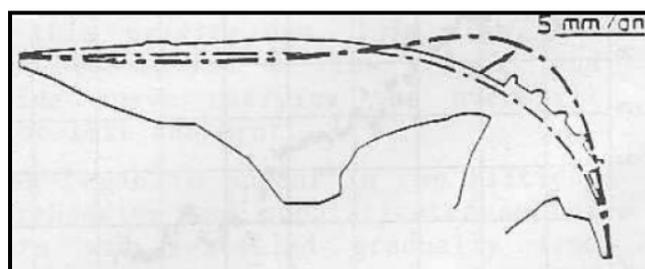


Figura 5.27.- movimientos hacia aguas arriba
(Bourdarot, 2006)

Después de un estudio cuidadoso se decidió que se realizarían 8 cortes verticales, distanciados unos 30 metros y de 20 de profundidad figura 5.28. Esta intervención se realizó entre 1995 i 1997. La intervención realizada conllevó una recuperación de la deformación de 20 mm, el retorno de estas deformaciones hacia aguas abajo representó recuperar los movimientos equivalentes a 10 años. Hoy, si bien es de forma atenuada, los movimientos expansivos vuelven a manifestarse en la presa, por lo que no se descartan nuevas medidas intervencionistas.

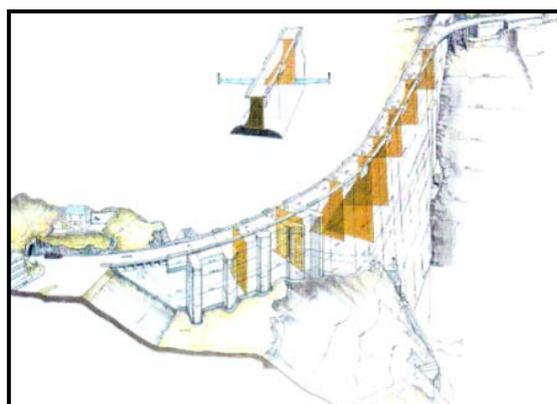


Figura 5.28- Distribución de los cortes realizados (Bourdarot, 2006)

5.2.3.3.3.- La presa de Pian Telesio.

La presa de arco gravedad de Pian Telesio, ha sido una de las últimas donde se ha aplicado la técnica del corte de hormigón, con sus últimas ventajas tecnológicas, por este motivo se le ha reservado un pequeño espacio en este capítulo. Esta presa fue construido en los años 1950-1955 en el marco del desarrollo hidroeléctrico en el Valle dell'Orco. Después de un período inicial de 20 años en los que la presa se había comportado de manera completamente normal, aparecieron en coronación unos movimientos irreversibles, en dirección aguas arriba, que llevaron a la presa a moverse unos 45 mm en dirección montaña.

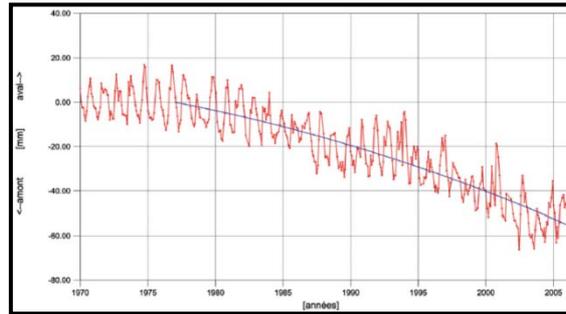


Figura 5.29- Movimientos en coronación (Amberg, 2007).

Este fenómeno, causado por una reacción álcali-silicato, tenía una capacidad expansiva de $30 \mu\text{m}/\text{m}/\text{año}$ en la parte superior de la presa y de prácticamente cero en la inferior. El fenómeno era mucho más virulento en la parte superior, es prueba de ello la grieta aparecida en la galería superior, mientras que en las zonas profundas no se apreciaron síntomas relevantes. Una razón en la diferencia en la expansión según la altura de la presa podría ser porque el hormigón usado durante el segundo año de construcción es mucho más permeable que los utilizados en otras fases debido a un cambio en su composición.

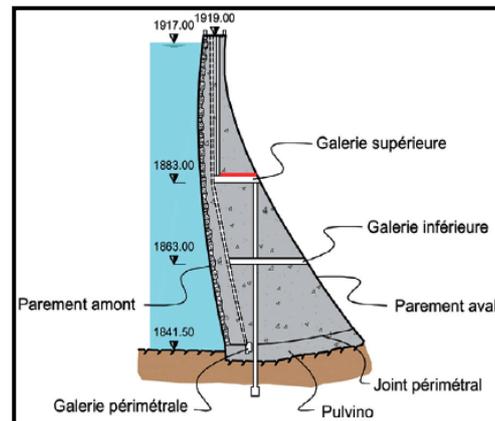


Figura 5.30- Fisura de la galería superior Figura 5.31- Esquema de la fisura anterior (Amberg, 2007).

La expansión ha generado a lo largo de los años un aumento de la tensión horizontal en los arcos debido al movimiento hacia aguas arriba, esto ha causado la apertura de las juntas perimetrales de pie de presa en la zona de aguas arriba. Estas aperturas, representan, sobre todo en verano en el caso de reducirse el nivel del agua, un aumento significativo de la tensión de compresión en el pie de la presa aguas arriba, pasando de 10 MPa en un régimen normal, a 15 MPa cuando se ha reducido el nivel del agua. Si se tiene en cuenta que el hormigón está preparado para resistir 23 MPa, los márgenes de seguridad no se respetaban.

Con el fin de evitar condiciones desfavorables de explotación y para garantizar la seguridad de la presa se ha considerado una intervención que pueda solucionar el problema al menos temporalmente.

Para contrarrestar los efectos del comportamiento reversible de la presa, se elaboro un proyecto innovador que consistía en la ejecución de 16 cortes en la mitad superior de la estructura en arco. Con este tipo de intervención se pretendía restablecer la situación tensional inicial, es decir se pretendía llegar a una tensión de compresión máxima de 3,6 MPa y a una tensión de tracción de 2,3 MPa.

La intervención, como se ha dicho, constaba de 16 cortes, figura 5.32, de longitudes que oscilan entre los 39 m, el más largo, y los 21 m, el más corto, con una superficie total cortada equivalente a 3500 m², y la posterior e inmediata inyección de las nuevas juntas verticales para recuperar de forma instantánea el efecto arco de la presa, necesario para mantener la estructura en pie, lo que añadía una dificultad nueva en la implementación de esta técnica.

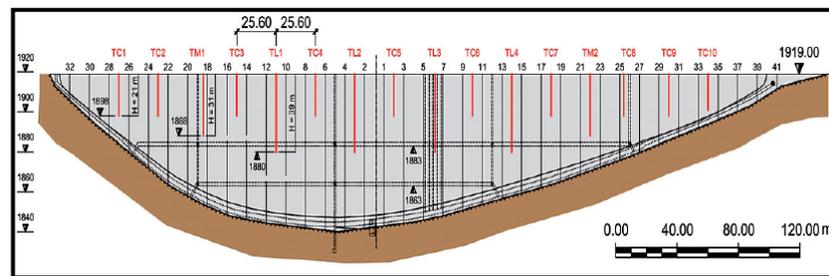


Figura 5.32- Ubicación de los cortes (Amberg, 2007).

El proceso de serrado se realiza de arriba hacia abajo y el cable da vueltas de manera que entra en el transmisor eléctrico aguas arriba con el fin de empujar los residuos aguas abajo.

Esta operación, que se empezó a realizar en 2007 y que finalizó en la primavera de 2008 valorada en 2,5 millones de euros, fue un éxito. El hándicap es que se tratan solo los efectos de la expansión, pero no sus causas y, por tanto, no es una solución permanente para la patología, pero lo que los expertos aseguran que la repetición de un proceso similar podría ser necesario en un futuro no lejano, 20 años puede ser la vida útil de esta intervención, si la expansión se mantiene constante.

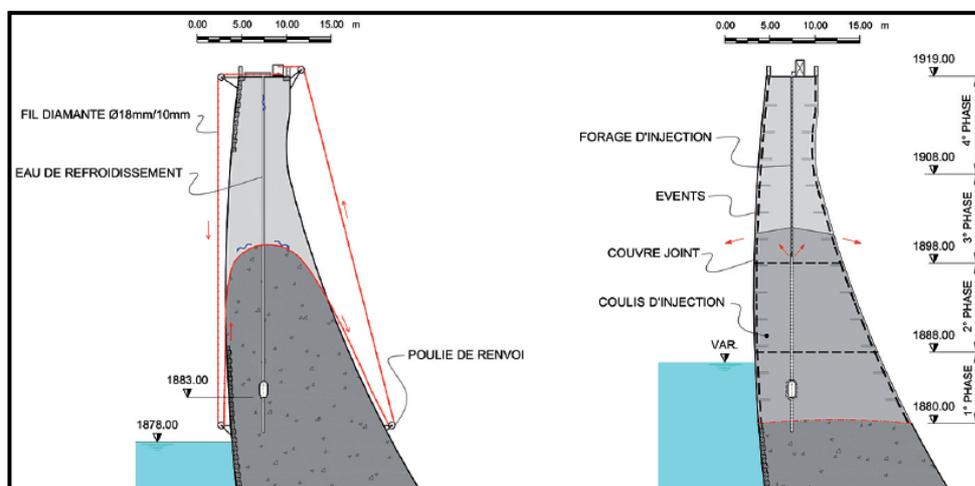


Figura 5.33- Esquema de la realización de los cortes (Amberg, 2007).

5.2.3.3.4.- La difícil predicción del futuro

Hay que reconocer que la mayor parte de los casos en que se aplicó la técnica del corte con hilo de diamante los resultados obtenidos fueron muy distantes de los previstos mediante métodos numéricos en los estudios previos. En algunos casos, incluso, los resultados obtenidos han sido mejores que los esperados, pero esto no deja de mostrar a quien estudia estos datos la falta de conocimiento del algún concepto que pueda dar una respuesta fiable a la aplicación de esta excelente técnica.

El principal problema en la aplicación de esta técnica es prever que sucederá con los cortes realizados, deducir a priori si los cortes se van a abrir o van a cerrarse una vez finalizados. En el caso que se cierren, lo más habitual, es muy difícil prever cuantitativamente si la clausura va a ser elástica, a breve plazo, o va a ser una clausura viscosa, a largo plazo. Esta última no solo depende de los esfuerzos que actúan sobre la estructura, influye también la evolución de la expansión química, los efectos térmicos, de los fenómenos viscosos...

En los modelos constitutivos del hormigón se asume generalmente el principio de superposición de efectos por lo cual la deformación total es la suma de varios componentes:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{exp} + \varepsilon_e + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_t \quad (5.2)$$

donde:

exp: componente debida a la reacción química expansiva

e: componente elástica debida a la carga aplicada

cr: componente debida al comportamiento viscoelástico del hormigón (fluencia)

t: componente debida al efecto térmico.

Siendo necesario recordar la interrelación que existe entre los cuatro fenómenos, una interacción que se ha explicado en capítulos precedentes.

Un problema añadido es cómo convertir las deformaciones en esfuerzos cuando la microfisuración reduce el módulo de elasticidad del hormigón (y sus prestaciones a compresión y tracción), mientras que al mismo tiempo aumenta la fluencia. En este sentido son muy importantes las pruebas de laboratorio en muestras tomadas en la estructura, y los registros de la instrumentación, cuyos resultados son básicos para formular los modelos numéricos que pueden servir para modelar este tipo de procesos, y en los que aun hoy se debe trabajar muchísimo.

Con todo, el corte de hormigón en presas que padecen expansiones se ha revelado como la técnica más eficaz para la reparación y mantenimiento de estas. Su objetivo, principalmente, como se ha explicado, es reducir los esfuerzos y las deformaciones a que es sometida la estructura debido a la expansión del hormigón.

La viabilidad a largo plazo del corte depende de la profundidad práctica de la apertura de corte, que disminuirá con el tiempo a causa de la evolución del fenómeno expansivo. Lo que se hizo evidente en los distintos casos examinados es que desde el punto de vista de la respuesta estructural no se pueden extrapolar los resultados obtenidos de una presa a otra. De todas formas, y sin ser útiles los resultados para otras presas, el hecho de

que las presas estén bien instrumentadas permite, cada vez mejor, conocer cuál es la evolución de los cortes y extraer en consecuencia conclusiones válidas acerca de esta técnica.

5.3.- PREVENCIÓN ANTE UNA POSIBLE REACCIÓN EXPANSIVA

Quienes conciben la construcción de una presa, entre muchas otras cosas deben decidir la ubicación de la cantera que va a suministrar el árido para la fabricación del hormigón. Una vez decidida esta ubicación hay que realizar los ensayos que dictaminan la potencialidad del árido para poder valorar si existe el riesgo de que el hormigón que se va a usar padezca en un futuro una reacción expansiva.

En el supuesto caso que se confirme que el árido de la cantera escogida sea reactiva existen dos posibilidades, cambiar la localización de la cantera o bien tomar una serie de medidas que deberían minimizar el riesgo del hormigón a padecer la expansión.

Tendencialmente la ubicación de la cantera es una variable bastante predeterminada, es decir, no es fácil reubicar la cantera para realizar una presa pues la cantidad de árido que se necesita para construir una presa es muy considerable. Existen dos condicionantes para dicha elección, encontrar una zona donde se pueda extraer la cantidad necesaria de árido, siempre si alterar excesivamente la naturaleza, y además que sea una zona próxima a la presa, al convertirse los gastos de transporte, en caso contrario, en un verdadero problema.

Por lo presentado en el párrafo previo, normalmente lo que se hace es intervenir sobre la segunda variable, es decir se intenta modificar la composición del hormigón añadiendo adiciones minerales.

Entre las adiciones minerales podemos diferenciar entre las denominadas activas y las inactivas. Las primeras tienen la capacidad de formar productos de hidratación similares a los que se producen durante el periodo de hidratación del clinker portland, mientras que las inactivas, si bien no presentan esta capacidad, suelen mejorar otras propiedades como la trabajabilidad y la resistencia temprana.

Entre las adiciones minerales activas se encuentra las puzolánicas que tienen la capacidad de hidratarse al combinarse con la cal libre que se produce durante la hidratación del cemento portland. Por otro lado existen la escoria granulada de alto horno, una adición activa que tiene la capacidad de formar C-S-H además de la de hidratarse.

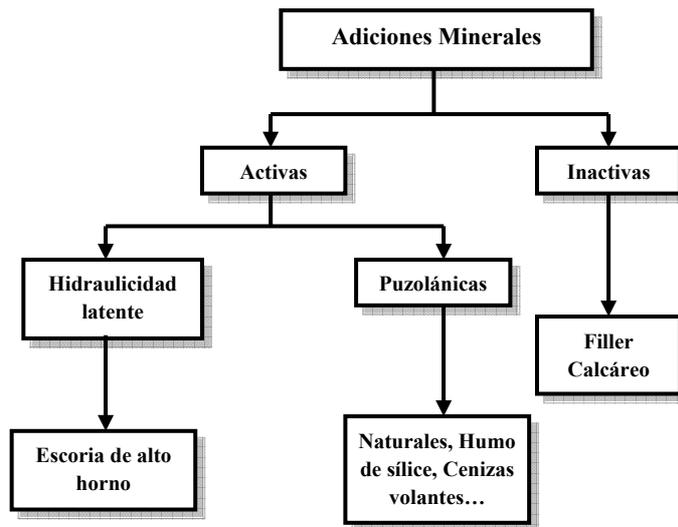


Figura 5.34-Tipo de adiciones minerales

5.4.1.- Puzolanas

La palabra puzolana se acuñó en Italia y se utilizó para describir las cenizas volcánicas de Pozzouli, una villa cerca de Nápoles. Las cenizas provenían de las erupciones del Monte Vesubio. Las puzolanas, naturales o artificiales, con el paso del tiempo, se han convertido en uno de los sistemas más válidos para reducir las consecuencias de las reacciones álcali-árido. Estas contienen sílice reactiva, la cual, finamente dividida reacciona rápidamente con los áridos de la solución de los poros, disminuyendo el poder de destrucción del gel en la matriz cementante. Sin embargo, la eficiencia de este tipo de material es función de la cantidad de fase amorfa y de las características microestructurales de la puzolana.

5.4.1.1.- Humo de sílice

Este tipo de material es mineralógicamente amorfo, constituido mayoritariamente, en una proporción variable que oscila entre el 85% y el 98 %, de sílice, además está formado por hierro, magnesio, calcio... prácticamente despreciables por su baja proporción.

Esta puzolana tiene la capacidad de reducir las consecuencias de la reacción álcali-agregado porque su presencia hace disminuir rápidamente la concentración de sílice en el cemento, dejando sin él a la reacción expansiva, más lenta, y evitando así una mayor expansión. En la figura 5.35 se observa que en un hormigón convencional existe, a los 300 días, una expansión del 0,9 %, mientras que sólo añadiendo un 10% de humo de sílice en la composición del hormigón este porcentaje se reduce al 0,1%.

La presencia de humo de sílice en el cemento “liga” parte de la porlandita, de por sí ineficiente mecánicamente, transformándola en el gel C-S-H, inocuo y resistente, evitando además que recaiga sobre él la acción disgregante del agua con sus beneficios evidentes.

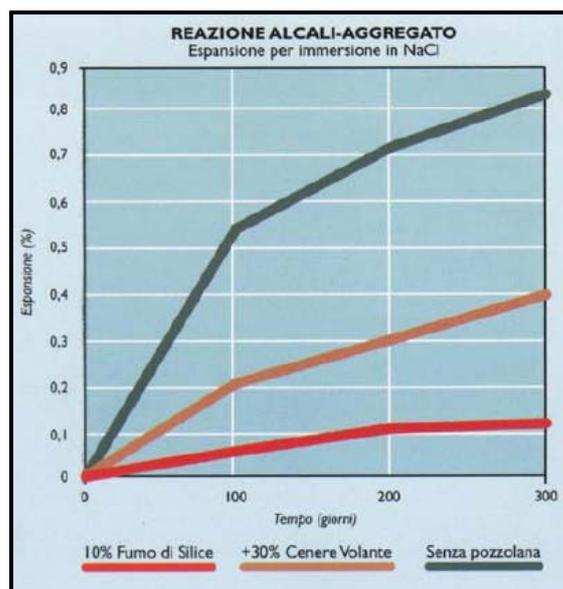


Figura 5.35- Expansión por inmersión en NaCl (Piagni, 1997)

5.4.1.2.- Cenizas Volantes

Las cenizas volantes son otro tipo de puzolanas artificiales, pues son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral para la generación de energía y constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases.

La cantidad de cenizas en el hormigón puede variar entre el 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes, según sea la composición de la ceniza y según sea el destino del hormigón. Para proteger a la estructura de las reacciones químicas expansivas producidas por un ataque sulfático se recomienda que el contenido de la ceniza alcance un 40% y que la relación agua/productos cementantes sea inferior a 0,45. Para hacer frente a una reacción álcali-agregado es más eficiente el humo de sílice, figura 5.35, y por eso no tienden a usarse las cenizas volantes para tal menester.

5.4.1.3.- Puzolanas naturales

Las puzolanas de origen natural son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. El material de las erupciones volcánicas, compuesto principalmente de aluminosilicatos, es enfriado bruscamente, lo que como resultado la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos. Se le atribuye la reactividad al poseer conjuntamente una estructura pobremente cristalina y a su vez disponer de una área superficial alta.

A modo de ejemplo, se muestran a continuación los resultados obtenidos con dos riolitas y una dacita cuando han sido aplicadas para reducir las reacciones expansivas del hormigón.

Material	Descripción
Dacia (PA)	<i>Traquidacita</i> : Roca volcánica con textura porfírica. Contiene feldespatos alcalinos y plagioclasas.
Riolita (PB)	<i>Toba vítrea</i> : Textura piroclástica de grano fino con fragmentos de feldespatos
Riolita (PC)	<i>Pumicita</i> : Textura vítrea con matriz de vidrio con composición ácida.

Tabla 5.1- Características de las puzolanas

En la figura 5.36 se presentan los resultados de expansión, en %, derivados de la reacción álcali-agradado, Valdez *et al.* (2008). Los resultados que se exponen se obtuvieron de ensayar una serie de barras de mortero hechas con un mortero de referencia (MR) donde se añadieron las puzolanas.

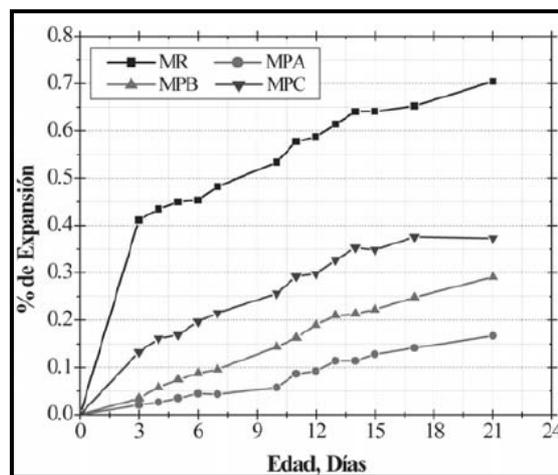


Figura 5.36- Curvas de expansión de las barras de mortero (Valdez et al., 2008).

Si se analizan los resultados obtenidos a los 21 días las expansiones que se observan en MR son de 0.7% mientras que en los morteros con las puzolanas PA, PB y PC las expansiones son del orden de 0.16%, 0.30% y 0.37% respectivamente, con lo que se hace evidente la reducción que se experimenta en la expansión.

La dacita da unos resultados mejores al ser la puzolana que contiene menos cantidad de álcali, mayor contenido de fase reactiva y mayor área superficial que el resto, por lo que se hace obvio que las propiedades de las puzolanas son determinantes en la reducción de la expansión.

5.4.2.- Escoria de alto horno

Las escorias de alto horno son subproductos no metálicos producidos en alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida se enfría rápidamente para formar gránulos, que son molidos hasta una finura similar a la del cemento portland. Estas escorias tienen de por sí propiedades cementantes pero éstas son mejoradas cuando se utilizan con cemento portland. La proporción en peso que suelen representar puede variar entre el 20% y el 70 %.

En la figura 5.37, donde se comparan un cemento CPN (cemento normal), un cemento con escorias (CPE) y un cemento con escorias de alto horno (CAH), puede observarse que el uso de escoria de alto horno en la elaboración de hormigón disminuye considerablemente la expansión por reacciones álcali-sílice de un agregado categorizado como potencialmente reactivo, lográndose un excelente desempeño del conjunto cemento-agregado alejándolo del riesgo de expansión deletérea. Por su parte, la figura 5.38 muestra que la adición de escoria granulada de alto horno también mejora sensiblemente el desempeño del cemento portland ante el ataque de sulfatos.

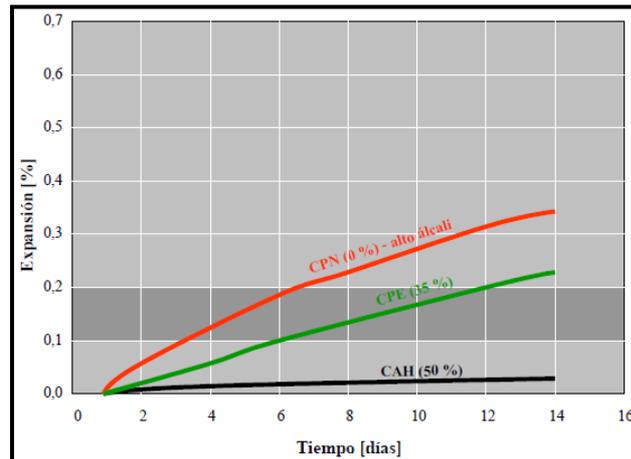


Figura 5.37- Curvas de expansión debidas a una reacción álcali árido, (Becker, 2002).

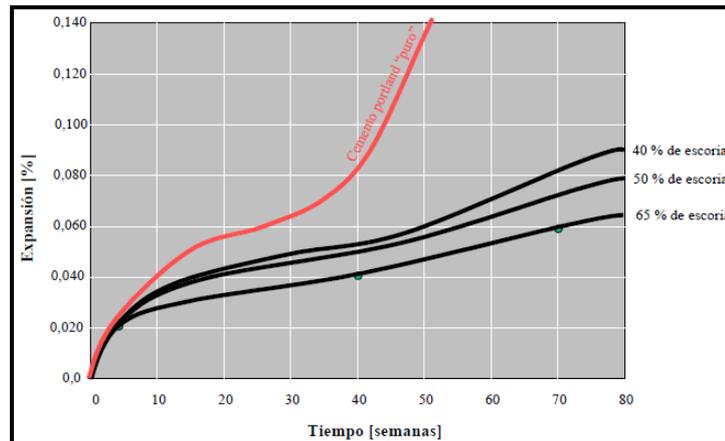


Figura 5.38- Curvas de expansión ante un ataque sulfático, (ACI, 1996).

5.4.3.- Otra ventaja de las adiciones

En los últimos años, en los países más industrializados ha surgido cierta preocupación respecto de las emisiones de CO_2 . La fabricación de cemento implica la transformación química de materias primas en un horno a elevadas temperaturas. Este proceso genera importantes cantidades de CO_2 . La utilización de adiciones minerales como reemplazo parcial de clinker reduce sustancialmente estas emisiones de CO_2 , lo que supone un incentivo añadido para utilizar este tipo de productos en la fabricación del hormigón de una presa.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan del estudio que se ha llevado a cabo. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas. Finalmente se presentan algunas posibles nuevas vías de investigación para seguir profundizando en el conocimiento de las expansiones en presas de hormigón.

Presentar unas conclusiones generales responde a la necesidad de presentar la realidad existente en torno a las reacciones expansivas que padecen presas de hormigón. Por otra parte, el objetivo de las conclusiones específicas es remarcar las pautas surgidas de este trabajo para efectuar un válido diagnóstico y tratamiento objeto de la observación y estudio.

6.2.- CONCLUSIONES GENERALES

La expansión que padece el hormigón de ciertas presas es un problema evidente para los propietarios de las mismas. Los responsables de explotación y mantenimiento de estas presas, de manera conjunta, con la comunidad científica deben trabajar, y trabajan, para subsanarlos.

No es fácil para los propietarios reconocer ciertos comportamientos anómalos presentes en tan singulares estructuras. Son muy loables, por este motivo, actitudes como las de las empresas Endesa Generación e Iberdrola Generación porque estudiar y fomentar la investigación de las expansiones que sufren presas de su propiedad.

Existen muchos estudios teóricos acerca de reacciones químicas que causan las expansiones del hormigón, pero la aplicación de estos estudios a casos reales es aún hoy escasa en toda la comunidad internacional. Las publicaciones del sector se basan en la clarificación de los causantes de las reacciones y en la presentación de las devastadoras

consecuencias, sin hacer especial hincapié en la detección del fenómeno en fase de posible corrección.

Los efectos de las expansiones en las presas se están dando a conocer en los últimos tiempos, pues siendo un fenómeno que necesita decenios para desarrollarse aún no es altamente evaluable, habiéndose podido valorar, solamente, algunos de los centenares de casos que existen.

La información publicada, es escasa y, además, se encuentra muy disgregada, en forma de pequeños artículos al alcance de muy pocos, siendo muy difícil hacer una buena recopilación en tiempo razonable. Esto impide gestionar de manera veloz y eficiente comportamientos anómalos que se manifiestan en presas.

Una presa pueda padecer innumerables patologías, para dirimir cual el causante de las manifestaciones anormales que pueden inducir a un estudio detallado hay que establecer una serie de protocolos que permiten ratificar o descartar ciertas hipótesis. Diagnosticar de manera eficiente, no es tarea fácil, pero es fundamental. Este documento presenta una metodología de trabajo que permite efectuar un diagnóstico de presas en las que se intuye la existencia de reacciones expansivas de hormigón. Con un diagnóstico fidedigno, será más fácil ejecutar un tratamiento adecuado a la situación presentada.

6.3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Es esencial que el estudio de una presa se realice como una única unidad estructural. Debe ser un Ingeniero, por su capacidad de analizar la estructura en su totalidad, quien valore las posibles causas de las anomalías que se puedan presentar y quien realice el diagnóstico y decida el tratamiento. Los profesionales de otros sectores, deben ser destacados colaboradores. Por ejemplo, no se podrían realizar estudios experimentales sin el trabajo de geólogos o químicos, pero su visión sesgada de la realidad podría perturbar el análisis, objetivo y sin prejuicios, que se debe efectuar para obtener unos resultados solventes.

Se presentan a continuación una serie de puntos técnicos considerados concluyentes del estudio efectuado:

- Es fundamental, para poder realizar un buen diagnóstico, que la presa disponga de un sistema de instrumentación que permita una buena auscultación. Además se deben realizar inspecciones periódicas, pues existen fenómenos que no son detectables por los instrumentos destinados a auscultar.

- Una inspección y una auscultación eficaces permiten detectar precozmente síntomas de expansión, y en consecuencia permiten actuar con mayor eficiencia y brillantez.

- El sistema de instrumentación, sin ser redundante, debe abarcar a la estructura completa, pues las anomalías pueden presentarse en cualquier zona de la presa.

- Se debe ser cuidadoso en la interpretación de los resultados presentados por los aparatos que forman el sistema de auscultación, no se debe menospreciar ningún dato.

- Los principales síntomas que pueden aparecer en una presa son:
 - Fisuración
 - Productos de la reacción
 - Movimientos remanentes
 - Variación de la apertura de juntas
 - Problemas en el funcionamiento de equipos
- Detectadas las anomalías que hacen intuir una reacción expansiva, se propone dividir la fase siguiente del estudio en 3 grandes bloques:
 - Estudio detallado de la presa, prestando especial atención en los síntomas que se manifiestan, tanto en la presa como en las obras anejas a la misma. A posteriori realizar una hipótesis expansiva.
 - Análisis de verificación experimental de la expansión
 - Comprobación de los efectos de la expansión mediante métodos numéricos y en consecuencia de la hipótesis realizada.
- Para determinar la hipótesis de trabajo, el factor más importante de todo el proceso de estudio de la expansión, se debe efectuar un diagnóstico correcto de la patología expansiva.
 - Un diagnóstico correcto solo se efectúa si se consigue objetivizar al máximo el análisis de los síntomas. El protocolo presentado pretende pautar el estudio de las signos patológicos que manifiesta la presa, para asegurar que el responsable del mismo pueda extraer unas conclusiones del mismo que le dirijan inequívocamente a un diagnóstico válido. Sólo si el diagnóstico es correcto el tratamiento puede ser eficiente.
 - Con un buen diagnóstico, verificado y comprobado, los responsables de las presas pueden escoger entre los distintos tratamientos presentados en el documento para hacer frente de la mejor manera posible al problema que se les ha generado.
 - Pautar el estudio de los síntomas no es garantía de eficacia, se cree que la experiencia es fundamental para interpretar los mensajes que la presa envía a aquellos que la estudian. Si bien esta experiencia no se puede adquirir desde un despacho, las presas expansivas estudiadas y, sobre todo, las estudiadas y tratadas, con o sin éxito, son el mejor ejemplo para ir formado a aquellos que se deben enfrentar a la expansión
- El tratamiento de una presa que padezca reacciones expansivas puede enfocarse desde 3 ópticas diversas:
 - Actuación pasiva

- Frenar la expansión del hormigón
- Corregir las consecuencias derivadas de la expansión

- La actuación pasiva que puede a su vez dividirse en 3 nuevos subgrupos, es adecuada para dos tipos de situaciones diversas. Si la presa está muy maltrecha por la expansión, no se debe invertir en su reparación y será mejor abandonarla y construir otra estructura semejante aguas abajo. Si, por lo contrario, la presa se encuentra en buen estado y se puede garantizar que la expansión ya está en fase de desactivación, tampoco es de recibo actuar sobre esta.

- El tratamiento conjunto formado por la inyección y saneamiento de las fisuras y la impermeabilización de la presa es la solución más eficiente para frenar el desarrollo de las reacciones expansivas que se producen en el sí de la presa.

- Las expansiones generan una serie de consecuencias que deterioran la presa y afectan a su estructura. Impedir que la reacción se desarrolle ayudará a evitar problemas futuros, pero para garantizar la seguridad hay que afrontar aquellos que ya se han presentado.

- Existen principalmente tres tratamientos correctores que se ejecutan en las presas para afrontar los problemas estructurales que se han derivado de la expansión:

- instalación de anclajes
- refuerzos de hormigón
- el corte con hilo diamantado

- El corte con hilo de diamante se presenta en los últimos tiempos como el tratamiento más utilizado por la comunidad ingenieril. Sus resultados son aún inciertos, pero muy esperanzadores.

- Para evitar que las reacciones expansivas se presenten en presas de futura construcción, si se da el caso que se debe usar árido reactivo existe la posibilidad de la modificar la composición del hormigón añadiendo adiciones minerales, estas pueden ser:

- Humo de sílice instalación de anclajes
- Cenizas Volantes refuerzos de hormigón
- Puzolanas naturales
- Escoria de alto horno

- No es fácil, hoy, acceder a documentos que permitan estudiar casos reales de presas que padezcan o hayan padecido reacciones expansivas. Para facilitar el acceso a esta documentación se ha concebido, diseñado y programado la BASE DE DATOS DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES, que nace con el objetivo de ser un documento público al alcance de los usuarios que lo necesiten.

- Esta base de datos, habiéndose probado en fase experimental, se ha revelado como un instrumento útil, accesible, dinámico y fácil de usar.

6.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- La mejor representación de la realidad es, sin duda, la propia realidad, por lo tanto la mejor manera de seguir avanzando en el estudio y conocimiento de las reacciones expansivas y la relación de estas con las presas es mediante el análisis de las presas de hormigón existente, por esto las autoridades públicas deben potenciar y facilitar a la comunidad científica el estudio de las presas de su propiedad, pues algunas podría padecer esta devastadora patología.

- Sería interesante seguir profundizando en el estudio de la cinética de las reacciones, sobre todo en el campo de la RSI.

- Proseguir la dinámica de los estudios de mesoescala. La durabilidad del hormigón queda en entredicho por la acción de las tensiones que se generan, y se debería evaluar como esto puede afectar en nuevas combinaciones de áridos alterados por las reacciones expansivas.

- La torsión es uno de los posibles causantes de la fisuración, como se ha visto, pero la vinculación de este esfuerzo a la reacción expansiva aún es pequeña, por lo que es necesario avanzar en las causas que pueden generar estos esfuerzos para poder buscar soluciones para reducirlos.

- Conocer los materiales que con los que se construyeron las presas, la procedencia de los mismos, las características del hormigón usado... es muy importante para iniciar la fase de diagnóstico. Esta información se desconoce en muchos casos, por lo que es importante, por una parte, aumentar los medios para realizar una tarea de búsqueda bibliográfica, y por otra parte fomentar que se registre toda esta información en las presas que se están realizando en la actualidad.

- Ampliar la base de datos que se adjunta a esta tesina. El principal objetivo debería ser extenderla a nivel internacional. La única base de datos parecida, salvando las distancias, existente es la de ACRES y carece de muchísima información. Lo ideal sería que las presas que aparecen en el anejo 1 de esta tesina algún día se encuentren todas en el anejo numero 2 y que la información sea tan contrastada como la de las presas españolas que hoy ya forman parte de este segundo anejo.

6.5.- VALORACIÓN DE ESTUDIO REALIZADO

Al dar inicio a una tesina de final de carrera el alumno se marca una serie de objetivos, muchas veces inconsciente de lo que esto puede representar, pues no conoce la realidad del trabajo de investigación.

Al finalizar este documento se puede decir que los objetivos marcados al inicio del periodo se han cumplido. Hoy existe un documento de consulta rápido que acerca las

reacciones expansivas en presas de hormigón al ingeniero de explotación, tanto en la vertiente de diagnóstico como de tratamiento. Este texto se presenta acompañado de una base de datos en formato digital que permitirá realizar consultas en tiempo real pues se pretende esté disponible próximamente en internet.

Al ocupar el documento un vacío en la bibliografía existente, no ha sido nada fácil redactar el texto, al ser la documentación escasísima y restringida. Han sido muy útiles para el autor, a la hora de redactar la tesina, las visitas que ha efectuado a distintas presas del estado. Con las visitas se ha aplicado y perfeccionado la metodología de trabajo, sobretodo en cuanto al diagnóstico. Remarcar que las visitas a presas no expansivas ha permitido hacer una comparativa del estado de deterioro entre unas y otras.

En referencia a la base de datos, dejar constancia que su elaboración no ha sido sencilla y que se ha prolongado durante varios meses. A los problemas intrínsecos de la programación informática, y de la recopilación de información, hay que añadir los derivados de la confección de un modelo de ficha didáctico, funcional y a la vez estético.

Para conseguir estos objetivos, los modelos parciales de la base de datos que se iban elaborando se fueron probando con usuarios de distinto perfil, consiguiendo una valoración objetiva e imparcial de la misma. Este proceso permitió reprogramar el sistema hasta ir definiendo el modelo que aquí se presenta.

Referencias bibliográficas

Aguado, A., Agulló, L., Casanova, I. y López, C. M. (1998), “Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura.” Comité Español de Grandes Presas. Premio José Torán, 103 p.

Alaejos, P. y Bermúdez M. A., (2003), “Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio bibliográfico”. Monografía CEDEX. Madrid, 168 p.

Amberg, F. (2007), “Assainissement du barrage de Pian Telessio par découpage au fil diamanté”. Wasser Energie Luft, vol. 99, pp. 289 - 292.

American Concrete Institut, ACI, (1998), “503 R. Use of epoxy compounds with concrete”.

American Concrete Institut, ACI, (1996), “233 R. Slag Cement in Concrete and Mortar”.

Araújo, G. S., Aguado, A. y Cinchón, S. (2008a), “Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack”. Ibracon Structures and Materials Journal, vol.1, 1, pp. 84-112.

Araújo, G. S. (2008b), “La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Ayala, F. (2006), “Manual de ingeniería de taludes”. Instituto Tecnológico Geominero, Madrid, 456 p.

Ayora, C., Cinchón, S., Aguado, A. y Guirado, F. (1998), “Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain.” Cement and Concrete Research, vol. 28, pp. 1223-1235.

Becker, E. (2002), “Cemento de alto horno, características y normas de uso”. Loma Negra, Buenos Aires, 10 p.

- Bourdarot, E. (2006), "RAG dans le barrage de Chambon". Colloque sur la reaction alcali-granulats dans les barrages en beton, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne.
- Bruce, D. y Masche, P. (1992), "Progress and Developments in Dam Rehabilitation by Grouting". Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. American Society of Civil Engineers. pp. 601-613.
- Buck, A. D. y Dolch, W. L. (1976), "Investigation of a Reaction Involving Nondolomitic Limestone Aggregate in Concrete". ACI Journal, vol. 63, 7, pp. 755 -766.
- Buil, J. M., Río, F., Aguado, A., Agulló, L., López C. M. y Araújo, G. S. (2008), "Revisión del diagnóstico de la presa de Mequinez". VIII Jornadas Comité Nacional Español de Grandes Presas, Granada, 12 p.
- Cajete, J. y Gil, A. (2000), "La importancia de inspecciones visuales en comparación con la instrumentación". XX Congreso Internacional de Grandes Presas, ICOLD, Pekín.
- Capra, B., Bourzanel, J. P. y Bourdarot, E. (1995), "Modeling of alkali-aggregate reaction effects in concrete dams." 2nd USCOLD International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams. Tennessee, pp. 441-455.
- Casanova, I., Agulló, L. y Aguado, A. (1996), "Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model". Cement and Concrete Research, vol. 26, pp. 993-998.
- Casanova, I., Agulló L. y Aguado, A. (1997), "Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack." Cement and Concrete Research, vol. 27, pp. 1627-1632.
- Coderch, J. (1999), "Riesgo en el empleo de resinas epoxi". Seguridad laboral, Alicante, pp. 40 - 48.
- Callepari, M., Coppola, L., Moriconi, G. y Pauri, M. (1980), "Diagnosi della reazione Alkali-aggregato in calcestruzzi degradati". L'industria Italiana del Cemento, 659, pp. 646 - 650.
- Comby, I. (2006), "Development and validation of a 3d computational tool to describe damage and fracture due to alkali-silica reaction in concrete structures." Tesis, Paris, 233 pp.
- Croston, T., Perez, R., Rodriguez, A. y Manfré, S. (2007), "Reparación de fisuras en estructuras de concreto por el sistema de inyección de resinas de uretanos". Rehabilitación de Estructuras, El Dorado, pp. 1- 9.
- Deng, M. Y Tang, M. (1992), "Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks". Cement and Concrete Research, vol 23, pp. 1397 - 1408.

Dent Glasser, L. S. y Kataoka, N. (1981), "the chemistry of alkali reaction". *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp. 1-9.

Espinós, J., Río, F., Campos, A., Oliveira, I. y Aguado, A. (2008), "Hipótesis de origen del comportamiento de la presa de Paso Nuevo". VIII Jornadas Comité Nacional Español de Grandes Presas, Granada, 10 p.

Garcés, P., Climent, M. A., de Vera, G., Lapuente, R.; Viqueira, E.; Zornoza, E., Sánchez, I. (2007) "Temas de Química (II) para alumnos de I.T.O.P. e I.C.C.P.", Alicante, Departamento de Ing. de la Construcción, Universidad de Alicante. 400 p.

Gil, A. y Cajete, J., (1991), "Study the interaction aggregate-paste in the concrete at the San Esteban Dam". XVII Congreso Internacional de Grandes Presas, ICOLD, Viena.

Gilliot, J. E. y Swenson, E. G. (1969), "Mechanism of Alkali-Carbonate Reaction". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 2, pp. 7 - 23.

Guerreiro, M., Fernández, R. y Gómez, G. (1991), "Causes of failure of the Fonsagrada Dam". XVII Congreso Internacional de Grandes Presas, ICOLD, Viena.

Hadley, D. W. (1964), "Alkali Reactivity of Dolomitic Carbonate Rocks". *Highway Research Record*, 45, pp. 1 - 20.

Hayward, D. G., Thompson, G.A., Charlwood, R.G. y Steele, R.R., (1991). "Remedial Measures at the Mactaquac Generating Station". 17th International Congress of Large Dams Q. 65, R. 47, Vienna, Austria.

Hill, C.J. (1995), "Gene Wash and Copper Basin Dams are Surviving Alkali - Aggregate Reaction". 2nd International Conference on Alkali - Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Chattanooga. pp. 275 - 288.

Herrador, M. (2002), "Modelo de comportamiento aplicable a hormigones de edad avanzada afectados por la reacción álcali-silicatos: desarrollo teórico y calibración experimental." Tesis Doctoral, A Coruña, 272 p.

Hobbs, D.W. (1988), "Alkali - silica reaction in concrete". American Society of Civil Engineers, New York, 192 p.

ICOLD (1991) "Alkali-Aggregate Reaction in concrete dams – Review and Recommendations". *Boletín* 79.

ICOLD (1997) "Concrete Dams - Control and Treatment of Cracks". *Boletín* 107.

Instituto Geológico y Minero de España (1971), "Mapa Geológico de España, E.1:200.000, Síntesis de la Cartografía existente.", Madrid.

Larive, C. (1998), "Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques." Tesis Doctoral, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

- Lombardi, G. (2006), "Monitoraggio in relazione alla manutenzione delle dighe". Giornata sul miglioramento e la riabilitazione delle dighe per preservare un importante capitale infrastrutturale. Problemi, possibilità e prospettive. ITCOLD. Roma, 20 p.
- López, L. A., Hernández, G. G. y Garrido, R. R. (2002), "Inspección y revisión de seguridad de presas. Metodologías y experiencias." VII Jornadas Españolas de Grandes Presas. Comité Nacional Español de Grandes Presas, vol. 3, Zaragoza, pp. 159-170.
- Marcello, A., Donghi, G. y Marcello, C. (2006), "Interventi alla diga del Poggia affetta da AAR". Giornata sul miglioramento e la riabilitazione delle dighe per preservare un importante capitale infrastrutturale. Problemi, possibilità e prospettive, ITCOLD. Roma, 37 p.
- Newell, A., Soderberg, D. Wagner C. (1997), "Rehabilitation of Chickamauga Dam, Lock and Powerhouse to Manage Concrete Growth". Waterpower'97. Georgia p. 285-293.
- Parra, J. L., (2004), "Materiales utilizados como áridos". Cátedra Anefa, Seminario. Madrid.
- Piagni, I. (1997), "Fumo di sílice e calcestruzzo". Materiali e tecnologia in concreto, 18, pp. 24 - 30.
- Plum, N. M., Poulsen, E. y Idorn, G. M. (1958), "Preliminary survey of alkali reaction in concret". Ingenieren Int. Denmark, 2, pp. 26 – 32
- Pujol, A. (2008), "Operación, control, rehabilitación y recrecimiento de presas". Comité Argentino de Presas. 76th ICOLT anual meeting, Sofia.
- Saouma, V.; Xi, Y. (2004), "Literature review of alkali aggregate reactions in concrete dams." Structural Engineering and Structural Mechanics Research Series, Boulder, 82 pp.
- Saouma, V. y Perotti, L. (2005), "Alkali-aggregate reactions in dams; Stress analysis and long term predictions". ASDSO Dam Safety Conference, New Orleans.
- Shayan, A. (1988), "Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates". Cement and Concrete Research, vol. 18, pp. 723-730.
- Stanton, T. E., (1940), "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate". American Society of Civil Engineers, vol. 66, New York, pp. 1781 – 1811.
- Stark, D y Bhatti, M. S.Y. (1986), Alkali-Silica Reactivity: Effect of Alkali in Aggregate on Expansion". Special Technical Publication, STP-930, ASTM, West Conshohocken, pp. 16 - 30.
- Thompson, G.A., Charlwood, R.G., Steele, R.R. y Curtis, D. D., (1994), "Mactaquac Generating Station Intake and Spillway Remedial Measures". 18th International Congress of Large Dams Q. 68, R. 24, Durban, South Africa.
- Ucar, R. (2005), "Manual de anclajes en ingeniería civil". López Jimeno, Madrid, 548 p.

Valdez, P.L., Fajardo, G., Hermosillo, R. y Flores, I. (2008), “Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado”. *Ciencia AUANL*, vol. 11, pp. 256 - 263.

Vallarino, E. (1973), “ Recrecimiento y refuerzo en presas de gravedad”. *Revista de Obras Públicas*, vol. 1, 120, pp. 593 - 608.

Van den Berg, C.L. y Seddon, C.V. (1991), “Alkali - aggregate reaction in large dams in South Africa. Effects and remedial measures” 17th ICOLD Congress on Large Dams, Viena. Pgs.703 – 718.

www.astm.org

Anejo 1

Presas de hormigón con expansiones

A1.1- INTRODUCCIÓN

Consciente de la importancia de transmitir información trascendente i fidedigna, el autor realiza en este anejo una selección de 103 presas de hormigón con expansiones y las presenta mediante un cuadro resumen donde se indican las características identificativas esenciales para la identificación de la presa y su patología, con la intención que un usuario cualquiera pueda saber, si quiere profundizar cuales son las presas del mundo que más han sido estudiadas en relación con las reacciones expansivas.

Este documento incorpora 79 presas presentes en un trabajo semejante realizado por ACRES (<http://www.acres.com/AcresGroup/Services/ServHydroAAR/indprj.htm>) y que recoge Segarra, si bien sólo se recogen las más relevantes. En ocasiones la información de estas 79 presas no coincide con la presentada en el mencionado trabajo. Además el autor incorpora 24 presas hasta la fecha inauditas en documentos parecidos, pues las considera dignas de estar en este grupo por su importancia a nivel docente.

Además en la parte final del anejo se añade una gráfica, realizada con las presas del anejo, donde se puede observar con facilidad el grado de utilización de los distintos tratamientos de los que se dispone hasta la fecha para afrontar la patología tratada a lo largo de este trabajo.

A1.2.- QUADRO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
1	Almendra	España	Bóveda	1970	202	Un bloque presenta fisuración	Hasta la fecha no se ha realizado ningún tratamiento.	N
2	Alto Ceira	Portugal	Arco gravedad	1949	37	Deformaciones anormales y fisuración extendida	Abandonada	A
3	American Falls	Estados Unidos	Gravedad recta	1958	31,5	Deformaciones anormales, fisuración extendida y productos de la reacción	Abandonada	A
4	Arlas	Suiza	Gravedad recta	1912	15	Deformaciones anormales y fisuración extendida	Abandonada	A
5	Asejire	Nigeria	Aliviadero de hormigón	1968	24	Fisuración estribos y compuertas atascadas	Inyección de cemento y epoxi	I
6	Bartlett	Estados Unidos	Arco Multiple	1936	67	Pérdida de resistencia del hormigón	Ningún tratamiento	N
7	Beauharnois	Canadá	Gravedad recta	1935	29	deformación, fisuración y ovalización de las unidades de la central	Inyecciones, colocar anclajes y cortes de hormigón	M
8	Belesar	España	Bóveda	1963	1929			
9	Bimont	Francia	Arco gravedad	1953	82,5	Fisuración extendida en el cuerpo de la presa	Inyecciones	I
10	Bloytjern	Noruega	Contrafuertes	1950	11	Fisuración vertical extendida	Cortes de hormigón	C
11	Buck	Estados Unidos	Gravedad recta	1912	10	Fisuración superficial extendida	Saneamiento de las fisuras	I
12	Canadea	Estados Unidos	Gravedad recta	1927	170	Fisuración mapeada	Reparaciones superficiales	S
13	Cahora Bassa	Mozambique	Arco gravedad	1974	40	Deformación y fisuración mapeada	Ninguna intervención hasta el momento	N
14	Castelnau	Francia	Gravedad recta	1950	60	Fisuración	Ningún tratamiento	N
15	Center Hill	Estados Unidos	Gravedad recta	1948	76	Filtraciones en juntas de construcción	Instalación anclajes y cortes hormigón	R/C

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
16	Chambon	Francia	Gravedad recta	1934	90	Considerables deformaciones y fisuración extendida	Inyección inicial de las fisuras e impermeabilización de paramentos, posteriormente cortes de hormigón	I/C
17	Chelsea	Canadá	Gravedad recta	14	1927	Fisuración y presencia de gel de sílice	Instalación anclajes y cortes hormigón	R/C
18	Chickamagua	Estados Unidos	Central hidroeléctrica	39	1940	Fisuración generalizada y productos de la reacción	Ejecución de cortes en el hormigón	C
19	Churchill	Sud África	Contrafuertes	39	1943	Fisuración horizontal	Refuerzo de los contrafuertes con hormigón armado	R
20	Chute-à-Caron	Canadá	Gravedad recta	-	1930	Deformaciones de la estructura	Ejecución de cortes en el hormigón	C
21	Coolidge Dam	Estados Unidos	Arco multiple	1929	77	Deterioro zonas del cuerpo de la presa y tasco de compuertas	Sustitución hormigón deteriorado y reparación órganos móviles	R
22	Conniston	Canadá	Gravedad recta	1935	14	Deformaciones anormales y fisuración extendida	Sustitución hormigón deteriorado	R
23	Corfino	Italia	Arco gravedad	1913	65	Fisuras superficiales	Inyección de fisuras	I
24	Copper Basin	Estados Unidos	Arco gravedad	1938	64	Deformaciones verticales, horizontales, fisuración extensiva y productos de la reacción	Ninguna medida correctora	N
25	Dale	Noruega	Gravedad recta	1952	20	Fisuración extendida sobretodo en el bloque de la esclusa	Inyección de fisuras, corte de las juntas de construcción e impermeabilización paramento	I/C
26	Dinas	Gran Bretaña	Arco gravedad	1957	23	Gran fisura longitudinal	Anclaje de la parte superior de la fisura a la parte de debajo. Inyección de la fisura y realización de cortes	R/I/C
27	Fonsagrada	España	Bóveda	1958	14	Rotura bóveda	Abandono	A
28	Fontana	Estados Unidos	Gravedad recta	1946	146	Fisuración extendida y productos de la reacción	Inyecciones de las fisuras y realización de cortes de hormigón	I/C

N°	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
29	Frian	Estados Unidos	Gravedad recta	1942	97	Grandes fisuras	Inyección de la fisura y colocación de anclajes	I/R
30	Gartshore	Canadá	Gravedad recta	1958	30	Movimientos diferenciales entre bloques y productos de la reacción	Ningún tratamiento	N
31	Gene Wash	Estados Unidos	Arco gravedad	1937	48	Perdida de resistencia del hormigón	Ninguna intervención al considerarse que la expansión se ha estabilizado	N
32	Gmund	Australia	Arco gravedad	1945	38	Deformaciones anormales y fisuración extendida	Reducción de la estructura a Arco y conexión de este con una nueva estructura a gravedad. Inyección de la junta de construcción	R/I
33	Graus	España	Gravedad recta	1960	27	Fisuración extendida, movimientos no recuperables y cambios de coloración	Ninguna intervención significativa, porqué los movimientos tienden a estabilizarse	I
34	High Falls	Canadá	Gravedad recta	1933	14	Fisuración difusa y productos de la reacción	Reparaciones puntuales de las zonas más afectadas	S
35	Hirakud	India	Gravedad recta	1956	40	Desprendimientos de hormigón, atasco de compuertas y fisuras	Instalación de anclajes e inyección de fisuras.	R/I
36	Hiwassee	Estados Unidos	Gravedad recta	1940	43,5	fisuración, desprendimientos de hormigón, productos de la reacción y además se dobló la compuerta del aliviadero	Ejecución de cuatro cortes en la estructura de hormigón y ajuste de la guía de la compuerta	C
37	Hollingsworth	Canadá	Gravedad recta	1959	27	fisuras en el puente-grúa. Fisuración de muros de ladrillo en cimentación y productos de la reacción	Inyección de fisuras	I
38	Horse Mesa	Estados Unidos	Arco gravedad	1927	93	Deterioro superficial, separación de algunas juntas	Reparación superficial	S

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
39	Hound Chute	Canadá	Central hidroeléctrica	1920		Fisuración superficial y productos de la reacción	Inyección y sellado de fisuras	I
40	Hunderfossen	Noruega	Aliviadero de hormigón	1963	15	Fisuración superficial	Ninguna intervención	N
41	Ilse	Suiza	Gravedad recta			Deformaciones permanentes, fisuración y filtraciones	Impermeabilización aguas arriba e inyección de fisuras	I
42	Kamburu	Kenia	Aliviadero de hormigón	1974	56	Fisuración y deformaciones anormales del aliviadero y productos de la reacción	Impermeabilización e inyección de la estructura, instalación de nuevos drenajes e instalación de anclajes	R/I
43	Kariba	Zambia	Arco gravedad	1955	128	Fisuración en el aliviadero	Ningún tratamiento	N
44	Keerom	Sud África	Arco gravedad	1954	38	Fisuración diagonal, apertura de juntas y pérdida de resistencia del hormigón	Inyección de juntas y de fisuras	I
45	Kleinplaas	Sud África	Aliviadero de hormigón	1980	20	Fisuración en galerías	Inyección y sellado de juntas	I
46	Kougha	Sud África	Arco gravedad	1978	78	Movimientos verticales y fisuración paramento aguas arriba	Ningún tratamiento	N
47	Kpong	Gana	Gravedad recta	1981	38	Fisuración en la central, ovalización del revestimiento de la unidad y productos de la reacción	Ningún tratamiento	N
48	Lady Evelyn Lake	Canadá	Central hidroeléctrica	1925		Fisuración extendida	Substitución del hormigón deteriorado	R
49	La Tuque	Estados Unidos	Gravedad recta	1940	40	Fisuración en las juntas de la estructura	Ejecución de un corte en el hormigón de la estructura	C
50	Mackay	Canadá	Gravedad recta	1936	29	Fisuras verticales, deterioro de los paramentos y productos de la reacción	Ningún tratamiento	N
51	Mactaquac	Canadá	Gravedad recta	1960	40	Deformación anormal, fisuración de las pilas y atasco de las compuertas	Ejecución de cortes en la estructura	C
52	Matabichuan	Canadá	Central hidroeléctrica	1909		Fisuración extendida y productos de la reacción	Rehabilitación superficial hormigón	S

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
53	Matilija	Estados Unidos	Arco gravedad	1947	58	Deterioro del paramento y fisuración extendida	Cortes de hormigón de la estructura y sustitución de los 12 metros superiores de hormigón	C/R
54	Maury	Francia	Arco gravedad	1947	72	Reducida fisuración	Ningún tratamiento	N
55	Maentwrog	Gran Bretaña	Arco gravedad	1926	35	Deterioro hormigón debido a la lixiviación	Sustitución del hormigón	R
56	McPhail	Canadá	Gravedad recta	1954	20	Desarrollo de algunas fisuras, escamación, rail del puente grua cortado	Reparación del puente grua	S
57	Mequinenza	España	Gravedad recta	1966	81	Entumecimiento	Refuerzo estructural	R
58	Moxoto	Brasil	Central hidroeléctrica	1974	36,55	Fisuración extendida, mal funcionamiento de la trubina	Cortes en la estructura de hormigón	C
59	Owen Falls	Uganda	Gravedad recta	1954	30	Fisuración extendida	Instalación de calves pretensados antes de identificar la expansión	R
60	Owyhee	Estados Unidos	Arco gravedad	1932	127	Ligera fisuración	Ningún tratamiento	N
61	Parker	Estados Unidos	Arco gravedad	1938	99,1	Fisuración extendida, reducción de la resistencia estructural del hormigón y de su modulo de elasticidad	Ningún tratamiento	N
62	Paso Nuevo	España	Gravedad recta	1969	73	Fisuración extendida, productos de la reacción y movimientos remanentes	Ningún tratamiento	N
63	Pathfinder	Estados Unidos	Arco gravedad	1909	65	Deterioro de los paramentos	Reparación superficial	S
64	Paugam	Canadá	Gravedad recta	1928	24	Fisuración extendida	Realización de cortes en la estructura de hormigón	C
65	Paul Sauer	Sud África	Arco gravedad	1969	82	Fisuración en juntas de construcción y movimientos de los bloques	Ningún tratamiento	N
66	Pedras	Brasil	Aliviadero de hormigón	1946	46	Fisuración extensiva	Ningún tratamiento	N

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
67	Piedra de Águila	Argentina	Gravedad recta	1985	170	Fisuración extendida	Detección de la patología en construcción, aplicación desde ese instante de cemento bajo en álcalis, inyección parcial de las juntas y instalación de barras de armadura en la zonas de las fisuras	R/I
68	Pietersfontein	Sud África	Arco gravedad	1968	29	Baja resistencia a flexión del hormigón	Ningún tratamiento	N
69	Poglia	Italia	Gravedad aligerada	1951	50	Deformaciones anormales y fisuración extendida	Corte del hormigón de la estructura	C
70	Poortjieskloof	Sud África	Arco gravedad	1955	38	Fisuración horizontal	Reparación Superficial	S
71	Portadeumorous	Spagna	Gravedad recta	1967	20	Fisuración extendida	Inyección de las fisuras y colocación de barras de armadura	I/R
72	Pracana	Portugal	Contrafuertes	1952	65	Fisuración en los contrafuertes y movimientos progresivos	Impermeabilización en la cara aguas arriba, inyección de las fisuras, el arriostamiento de los contrafuertes y consolidación de la cimentación	I/R
73	Rapid des isles	Canadá	Central hidroléctrica			Fisuración en mapa , productos de reacción y fisuras en las juntas de construcción	Ningún tratamiento	N
74	Rápid Farmers	Canadá	Gravedad recta	1927	16	Fisuras en las juntas de construcción	Realización de cortes en el hormigón de las estructura	C
75	Rihand	India	Gravedad recta	1962	93	Fisuración en el cuerpo de presa y atasco de compuertas	Inyección de fisuras y reparación de los órganos móviles	
76	RH Sunders	Canadá	Gravedad	1947	49	Expansión y movimientos de los bloques	Ejecución de cortes de hormigón en la estructura	C
77	Roode Elsburg	Sud África	Arco gravedad	1968	72	Fisuración y vibración en la turbina	Reparación de la turbina	S

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
78	Rossvass	Noruega	Gravedad recta	1957	15	Fisuración	Realización de nuevosmuros de contención para la presa. Colocación de una nueva esclusa.	R
79	Rumedo	España	Gravedad recta	1971	9	Fisuración extendida, productos de la reacción y movimientos remanentes	Tratamientos superficiales e impermeabilización	I/S
80	Salas	España	Contrafuertes	1973	50	Fisuración horizontal, filtraciones y expansión de los contrafuertes	Inyección de las fisuras, sellado de juntas e impermeabilización de las zonas fisuradas	I
81	San Esteban	España	Arco gravedad	1955	115	Fisuración mapeada, cambios de coloración, movimientos de los bloques y filtraciones	Inyección de fisuras e impermeabilización de la parte alta de la presa	I
82	Santa Luzia	Portugal	Arco gravedad	1943	76	Movimientos horizontales y verticales	Sellado del paramento aguas arriba	I
83	Santeetlah	Estados Unidos	Arco gravedad	1928	61	Productos de la reacción, fisuración en mapa extendida	Cortes de hormigón de la estructura, inyección de fisuras y sustitución de hormigón	C//R
84	Sartigan	Canadá	Gravedad recta	1967	30	Fisuración en mapa, productos de la reacción, deformación de las pilas del aliviadero	Ninguna intervención	N
85	Scala	Suiza	Arco gravedad	1910	26	Fisuración extendida	El hormigón del paramento aguas abajo fue anclado al cuerpo central de la estructura, impermeabilización del paramento aguas arriba	R/I
86	Scott Falls	Canadá	Gravedad recta	1953	29	Productos de la reacción y microfisuración extendida	Ninguna intervención	N

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
87	Skarsfoss	Noruega	Ambursen		30	Filtraciones y fisuración extendida	Impermeabilización del paramento aguas arriba, de las juntas de construcción y de la zona de coronación	I
88	Song Loulou	Camerún	Gravedad recta y contrafuertes	1976		Fisuración extendida y filtraciones	Ejecución de nuevos drenajes	I
89	Steenbras	Sud África	Central Hidroeléctrica	1964		Movimientos remanentes	Ninguna intervención hasta la fecha	N
90	Stewart Mountain	Estados Unidos	Arco gravedad	1928	65	Productos de la reacción, fisuración extendida, movimientos y expansión de bloques	Nuevo sistema de drenaje. Se considera que la expansión se ha detenido	I
91	Stolsvatn	Noruega	Arco múltiple	1970	18	Fisuración extendida y productos de la reacción	Inyección de las fisuras e implantación de anclajes	I/R
92	Stompdrift	Sud África	Arco múltiple	1965	49	Fisuración extendida y apertura de juntas	Inyección de las juntas de construcción	I
93	St. Marys	Canadá	Aliviadero de hormigón	1951	19	Movimientos diferenciales, fisuración y productos de reacción	Reparación superficial	S
94	Tabescán	España	Gravedad recta	1960	30	Fisuración orientada, cambios de coloración, movimientos remanentes y atasco de órganos móviles	Ninguna intervención significativa, porque los movimientos tienden a estabilizarse	I
95	Temiscouata	Canadá	Aliviadero de hormigón	1933		Fisuración superficial	Sellado de las fisuras	I
96	Tislei	Noruega	Ambursen	1952	15	Movimiento en el bloque de la esclusa y fisuración difusa	Impermeabilización y ejecución de cortes de hormigón en las juntas de la presa	I/C
97	Torán	España	Gravedad recta	1960	36	Fisuración enramada, cambios de coloración, movimientos remanentes	Tratamiento superficial impermeabilización del hormigón y de las juntas, tratamiento de las fisuras e instalación de un nuevo sistema de drenaje	S/I

Nº	Nombre presa	País	Tipología	Fecha construcción	Altura (m)	Síntomas	Tratamiento	Tipo tratamiento
98	Torrejón-Tajo	España	Gravedad recta	1966	62	?	?	N
99	Torrejón-Tiétar	España	Gravedad recta	1967	30	?	?	N
100	Urrunaga	España	Contrafuertes	1957	31	?	?	N
101	Val del mare	Gran Bretaña	Gravedad recta	1971	30	Movimiento de los bloques, productos de la reacción y fisuración extendida	Reparación superficial de los bloques, inyección de fisuras i anclaje del bloque 3	I/S/A
102	Warm Spring	Estados Unidos	Arco gravedad	1919	32.3	Desplazamientos horizontales, deterioro exterior	Ninguna medida adoptada	
103	Warsak	Pakistan	Gravedad recta	1960	22	Movimientos de los bloques y fisuración enramada	Inyección de las fisuras y sustitución del hormigón alterado	I/R

Nota: Las presas que aparecen con un signo de interrogación (?) son aquellas de las que la autoridad no ha permitido revelar los datos relacionados con la expansión

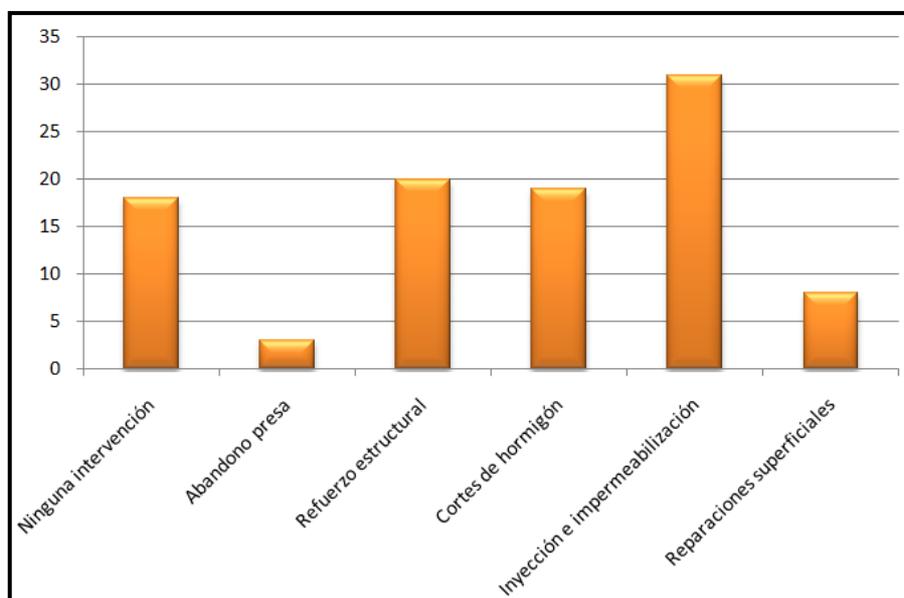
A1.3.- CUADRO RESUMEN

Figura A1.1: Gráfico resumen del anejo 1. Porcentaje con el que se presentan los distintos tipos de intervención en una presa

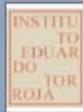
Anejo 2

Base de datos de presas de hormigón con expansiones

A2.1- INTRODUCCIÓN

El objeto de este anejo es presentar la BASE DE DATOS DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.

Las hojas que se adjuntan son aquellas que se pueden extraer directamente de la Base de Datos.



Base de datos de presas de hormigón con expansiones



[Inicio](#)

[Índice de presas](#)

[Razón de ser](#)

[Guía para el usuario](#)



Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Razón de ser



El objeto de esta base de datos es presentar distintos casos de presas de hormigón con expansiones.

En las circunstancias actuales si un ingeniero desea acceder de forma rápida y eficaz a informaciones fidedignas que le acerquen a la problemática de las expansiones del hormigón con la intención de resolver un problema real se encuentra con muchas dificultades.

La información de la que hoy disponemos está disgregada y dispersa, por lo que no es fácil conocer el estado de arte de presas que hayan sufrido esta patología. El deseo con que se inició este proyecto era facilitar a los ingenieros, sobre todo a los del ámbito de la explotación, un acceso rápido a toda la información que les pueda ser útil para poder resolver velozmente el problema de expansión con que se puedan encontrar.

La base de datos elaborada se crea con la intención que en pocas horas, máximo una mañana, hasta la fecha se necesitaban semanas o incluso meses, un ingeniero responsable de una presa pueda visualizar las fichas de otras presas que han sufrido reacciones expansivas.

Con esto se pretende que el usuario pueda acceder a una información que le permita obtener una visión global de las expansiones y a la vez darle la posibilidad de estudiar una serie de presas que presenten las mismas características que la que supervisa, ya sean éstas: técnicas, geológicas, sintomatológicas..., para ayudarle a solventar el problema que se le presenta de la mejor y más rápida manera posible.

La utilización del entorno de Internet permite configurar una adecuada conexión entre el administrador y el administrado, o dicho de otra manera, entre el científico y el técnico, ofreciendo una actualización continua y automática de la información, lo que sin duda redundará en un servicio de mayor calidad, más dinámico y más accesible para todos.

Dentro del sistema general se ha desarrollado una herramienta que permite consultar de cada una de las presas la información más relevante dividiéndola en 6 grupos: identificación, proyecto, construcción/materiales, explotación, síntomas/diagnóstico de la expansión y actuaciones principales. Además, siempre que se dispone de la información adecuada, se adjuntan informes técnicos, planos de la presa y una serie de enlaces interactivos donde se puede acceder a información útil de la presa o de la patología en cuestión.

El trabajo ha sido desarrollado en el Departament d'Enginyeria de la Construcció del la Universitat Politècnica de Catalunya. Ha sido dirigido por los Drs. Antonio Aguado de Cea y Luís Agulló Fité, Catedráticos de Hormigón, y realizado por el estudiante de I.T.S.C.C.P. Francesc Pardo Bosch como parte de su Tesina de Final de Carrera.



Base de datos de presas de hormigón con expansiones

Guía para el usuario



Este documento pretende ser una guía práctica para que el usuario sepa como desenvolverse en la BASE DE DATOS DE PRESAS DE HORMIGÓN CON EXPANSIONES.

Cuando el usuario entra en el menú inicio se encuentra con 6 campos de búsqueda, que corresponden a las 6 grandes áreas temáticas en que ha sido dividida la ficha informativa-resumen de cada una de las presas que contiene la base datos.

Los campos que se encuentran en el menú inició, y que serán descritos a continuación, son: Identificación, Proyecto, Construcción/Materiales, Explotación, Síntomas/Diagnóstico, Actuaciones principales.

Identificación: Si el usuario entra en este campo podrá buscar la presa a partir de una serie de conceptos que la identifican y la sitúan geográficamente de manera inequívoca. Además se pueden buscar en este menú las presas de un determinado propietario.

Proyecto: En este campo se pueden buscar las presas que reúnan una serie de características técnicas de proyecto.

Construcción/Materiales: Este es un campo que permite realizar búsquedas a partir de los conceptos relacionados con todo el proceso constructivo, incluyendo el tipo de materiales que en el se han utilizado y que pueden afectar en el desarrollo de la patología estudiada.

Explotación: Se puede realizar la búsqueda de las presa a partir de las características del desarrollo normal del proceso de explotación de una presa.

Síntomas/Diagnóstico Expansión: Si la búsqueda se realiza desde de este campo el usuario puede escoger dos submenús: Síntomas, donde se pueden seleccionar los síntomas que se hayan manifestado y las fechas de su detección, y el Diagnóstico, donde lo que se pretende es mostrar por separado, según la necesidad del usuario, las presas que hayan padecido las distintas reacciones expansivas.

Actuaciones principales: Se pueden buscar las presas a partir de las principales intervenciones que se hayan realizado para solventar la problemática de la expansión del hormigón.

Además el usuario tiene la posibilidad de ir desde la página principal a otro menú llamado índice de presas.

Índice de presas: Aparen en él todas las presas que contiene la base de datos, ordenadas según el código del Ministerio de Fomento y además se indica la reacción causante de la expansión.

NOTA DEL AUTOR:

Las fichas que presentan nombres de presa acompañados con un asterisco (*), solo presentan la información general pública de la misma. NO se muestra, en estas fichas información específica de la expansión del hormigón por deseo del propietario, quien está en estos momentos estudiando el caso. Por este motivo aparece en blanco la casilla de Tipo de Reacción en el índice de presas.



Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Índice de presas



Código

Nombre Presa

Tipo de reacción

344	San Esteban	Álcali-sílice	Abrir formulario
396	Urrunaga*		Abrir formulario
412	Fonsagrada	Ataque sulfático externo	Abrir formulario
509	Belesar	Álcali-sílice	Abrir formulario
542	Torán	Ataque sulfático interno	Abrir formulario
573	Mequinenza	Entumecimiento	Abrir formulario
578	Tabescán	Ataque sulfático interno	Abrir formulario
580	Torrejón-Tajo*		Abrir formulario
601	Portodemouros	Álcali-sílice	Abrir formulario
602	Torrejón-Tiétar*		Abrir formulario
639	Paso Nuevo	Ataque sulfático interno	Abrir formulario
645	Almendra*		Abrir formulario
682	Rumedo	Ataque sulfático interno	Abrir formulario
683	Salas	Álcali-sílice	Abrir formulario
713	Graus	Ataque sulfático interno	Abrir formulario



Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Índice de Búsqueda



DATOS GENERALES

Nombre	<input type="text"/>	Comunidad autónoma	<input type="text"/>
Termino municipal	<input type="text"/>	Provincia	<input type="text"/>
Tipología	<input type="text"/>	Cuenca hidrografica	<input type="text"/>
Propietario	<input type="text"/>	Río	<input type="text"/>
Destino	<input type="text"/>		

PROYECTO

Tipo de cerrada	<input type="text"/>
Altura	<input type="text"/>
Aliviadero	<input type="text"/>

CONSTRUCCIÓN/MATERIALES

Método construcctivo	<input type="text"/>
Año terminación construcción	<input type="text"/>

EXPLOTACIÓN

Tipo análisis datos	<input type="text"/>
Actuaciones asociadas explotación	<input type="text"/>

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Edad de la presa al detectarse los síntomas

Año detección síntomas

Tipo de síntomas manifestados

Fisuración mapeada

Fisuración orientada

Cambios de coloración

Cerramiento juntas

Filtraciones

Movimientos remanentes

Productos de la reacción

Incidencias órganos móviles

Análisis obras entorno

Diagnóstico

Tipo de reacción

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención

Abandono presa

Sellar/inyectar fisuras

Realizar juntas

Rehacer juntas

Instalar anclaje

Sustituir/añadir hormigón

Imprimación

Impermeabilizar

Ajuste órganos móviles



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

San Esteban

Código:

344

País:

España

Situación en el mapa:

C-2

Comunidad autónoma:

Galicia

Provincia:

Orense

Termino municipal:

Nogueira y Ramuín

Río:

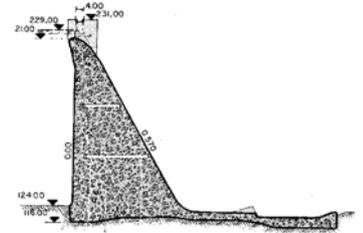
Sil

Cuenca hidrográfica:

Norte

Destino:

Energía



Propietario:

Iberdrola Generación

Proyectista:

Zapata, Corral y Rz.Conde

Constructor:

D. y C.

PROYECTO

Tipología:

Arco Gravedad

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m³): V. embalse (Hm³) S. embalse (m²)

U

115

295

4,0

474.300

213

737

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m³/s)

4.500

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1955

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Cantera de la zona

Tipo de árido:

Granito de dos micas, con piritas

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Ninguna

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios



SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas



Localización del daño

Diagnóstico

Tipo de reacción

Álcali-sílice

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título	Referencia	Documento
"Study on the interaction aggregate-paste in the concrete at the San Esteban dam"	http://www.icold-cigb.net/	
"Regeneración e impermeabilización de la presa de San Esteban"		
"Revisión General y Actuaciones en la Presa de San Esteban"	http://ropdogotal.ciccp.es	
"Safety for concret dams"		
METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DETERIORO DEL HORMIGÓN OCASIONADO POR LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE		



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Urrunaga*

Código:

396

País:

España

Situación en el mapa:

H-1

Comunidad autónoma:

País Vasco

Provincia:

Álava

Termino municipal:

Villareal de Álava

Río:

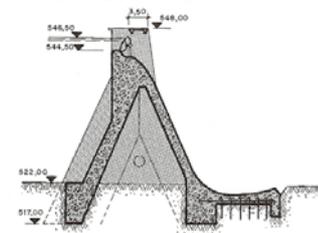
Sta. Engracia

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía



Propietario:

Iberdrola Generación

Proyctista:

A. del Águila

Constructor:

Arregui S.A.

PROYECTO

Tipología:

Contrafuertes

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

31

490

3,5

82.000

72

785

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

410

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1957

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Diagnóstico

Tipo de reacción

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

La bibliografía disponible es de propiedad intelectual de Iberdrola Generación



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES

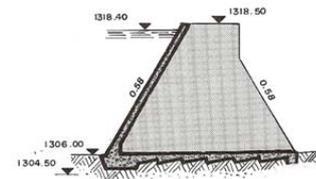


Nombre Presa:

Fonsagrada

Código:

412



País:

España

Situación en el mapa:

D-1

Comunidad autónoma:

Galicia

Provincia:

Lugo

Termino municipal:

Fonsagrada

Río:

Leguaseca

Cuenca hidrográfica:

Norte

Destino:

Abastecimiento

Propietario:

Ayto. Fonsagrada

Proyectista:

J. González y F. López Villamil

Constructor:

A. Diaz Caveda

PROYECTO

Tipología:

Bóvedas-múltiples

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m³): V. embalse (Hm³) S. embalse (m²)

14

62

1.000

0,01

0,1

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Lámina libre

Capacidad del aliviadero (m³/s)

2

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1958

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

pizarra

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Ninguna

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

No hay instrumentación y no existen datos

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas **1987**

Edad de la presa al detectarse los síntomas: **29 años**

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Rotura Bóveda

Diagnóstico

Tipo de reacción **Ataque sulfático externo**

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



IBERDROLA

Bibliografía

Título Referencia Documento

"Reflexiones y estudios sobre las causas de la rotura de la presa de Leguaseca"

<http://www.icold-cigb.net/>



"Safety for concret dams"



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Belesar

Código:

509

País:

España

Situación en el mapa:

C-2

Comunidad autónoma:

Galicia

Provincia:

Lugo

Termino municipal:

Chantada

Río:

Miño

Cuenca hidrográfica:

Norte

Destino:

Energía



Propietario:

Union Fenosa Generación

Proyctista:

L.Yordi

Constructor:

D. y C.

PROYECTO

Tipología:

Bóveda-cúpula

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

V

129

600

5,5

735.000

655

1.828

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

4.000

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1963

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón



Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Tratamientos superficiales

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas 1992

Edad de la presa al detectarse los síntomas: 19 años

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Cuerpo de presa

Diagnóstico

Tipo de reacción

Álcali-sílice

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Periodo actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Soluciones totales o parciales a los problemas derivados de reacciones tipo álcali-sílice en los hormigones de presas en explotación"

<http://www.spancold.es>



"Presa de Belesar de doble curvatura de hormigón en masa"

<http://ropdogotal.ciccp.es>



"Safety assesment in concret dams"



"Structural identification of an arch model with linear and non-linear materiall models"



"Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice"



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES

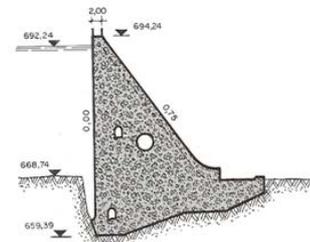


Nombre Presa:

Torán

Código:

542



País:

España

Situación en el mapa:

K-1

Comunidad autónoma:

Cataluña

Provincia:

Lérida

Termino municipal:

Caneján

Río:

Torán

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía

Propietario:

Endesa Generación

Proyectista:

S. Gossé y J. Serrano

Constructor:

C.O.P.I.S.A.

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m³): V. embalse (Hm³) S. embalse (m²)

V

35

93

2,0

14.000

0,2

2

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Lámina libre

Capacidad del aliviadero (m³/s)

132

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

1956

Año terminación construcción:

1960

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

pizarra metamórfica

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Ninguna

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño Cuerpo de presa/elementos auxiliares

Diagnóstico

Tipo de reacción Ataque sulfático interno Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Análisis de la fisuración orientada en coronación: interacción estribo-estructura"

<http://www.spancold.es>



"Comportamiento de presas de gravedad de hormigón con problemas de ataque interno por sulfatos"



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Mequinenza

Código:

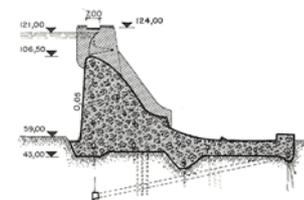
573

País:

España

Situación en el mapa:

J-3



Comunidad autónoma:

Aragón

Provincia:

Zaragoza

Termino municipal:

Mequinenza

Río:

Ebro

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía

Propietario:

E.N.H.E.R.

Proyectista:

Sanchez del Corral

Constructor:

E.N.H.E.R.

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

81

451

7

1.100.000

1.534

7.729

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

12.800

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1966

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

ampliación de la impermeabilización

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

No hay instrumentación y no existen datos

Disponibilidad de estudios



SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas

Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas



Localización del daño

Diagnóstico

Tipo de reacción

Entumecimiento

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Revisión del diagnóstico de la presa de Mequinenza"

<http://www.spancold.es>



"Safety for concret dams"



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES

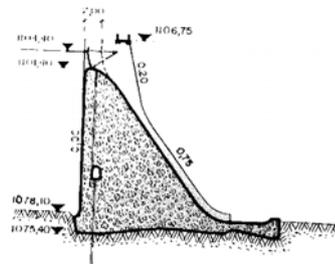


Nombre Presa:

Tabescán

Código:

578



País:

España

Situación en el mapa:

K-2

Comunidad autónoma:

Cataluña

Provincia:

Lérida

Termino municipal:

Lladorre

Río:

Noguera de Cardós

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía

Propietario:

Endesa Generación

Proyctista:

J. Serrano

Constructor:

C.O.P.I.S.A.

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

V

31

56,800

2,0

13.000

0,6

8

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

216,700

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

1961

Año terminación construcción:

1965

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:



Tipo de árido:

pizarra metamórfica

Estudios sobre los áridos



Tipo de conglomerante:

P-250 (PIRINEO)

Estudios sobre el cemento



Procedencia del agua:



Ubicación central de hormigón:



Estudios de Hormigón



Estudios sobre el agua



EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Impermeabilización y sellado de fisuras

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas

Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas



Localización del daño

Cuerpo de presa/elementos auxiliares

Diagnóstico

Tipo de reacción

Ataque sulfático interno

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Periodo actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título	Referencia	Documento
“Diagnosis of the behaviour of the Graus and Tabescán dams”.	http://www.icold-cigb.net/	
“Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model.”		
“Agregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack.”		
“Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura.”	http://www.spancold.es	
“Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain.”		
“Funciones de ajuste del comportamiento de expansiones en hormigón de presas.”	http://www.taylorandfrancis.com/default.asp	
“Análisis del comportamiento estructural del hormigón: de la micro a la macro estructura. Aplicación al caso de presas”.	http://www.e-ache.net/articulos_detalle.asp?id=87	
“Efeitos da pirrotita presente nos agregados empregados no concreto de barragens.”	http://www.ibracon.org.br/congresso/47cbc/index.php	
"Metodología en el diagnóstico del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán"		
“Estudio del comportamiento de presas de hormigón frente al ataque sulfúrico.”	http://e-ache.com/	



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Torrejón-Tajo*

Código:

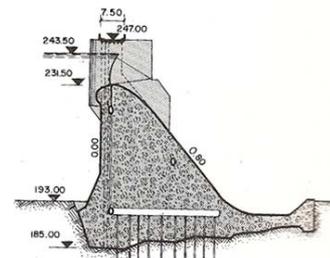
580

País:

España

Situación en el mapa:

E-5



Comunidad autónoma:

Extremadura

Provincia:

Cáceres

Termino municipal:

Torrejón

Río:

Tajo

Cuenca hidrográfica:

Tajo

Destino:

Energía

Propietario:

Iberdrola Generación

Proyectista:

M. Castillo y D.Mndez Boudes

Constructor:

Agromán

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

62

300

7,5

248.000

176

1.041

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

6.000

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1966

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Elementos auxiliares

Diagnóstico

Tipo de reacción

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

La bibliografía disponible es de propiedad intelectual de Iberdrola Generación



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Portodemouros

Código:

601

País:

España

Situación en el mapa:

C-2

Comunidad autónoma:

Galicia

Provincia:

La Coruña

Termino municipal:

Arzúa, Lalin y Golada

Río:

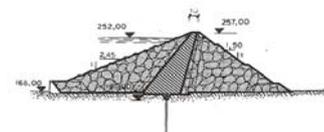
Ulla

Cuenca hidrográfica:

Norte

Destino:

Energía



Propietario:

Union Fenosa generación

Proyectista:

Guitar, de Miqguel y Platero

Constructor:

G.O.I.S.A. WALSH

PROYECTO

Tipología:

Escollera

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

91

460

10

2.337.000

297

1.205

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Lámina libre

Capacidad del aliviadero (m3/s)

1.550

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1967

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Tratamientos superficiales

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas 1973

Edad de la presa al detectarse los síntomas: 6 años

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Aliviadero

Diagnóstico

Tipo de reacción

Álcali-sílice

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Concrete cracking in two dams"



"Problemas expansivos en el hormigón, detección y tratamiento"



"Impermeabilización del Aliviadero de la presa de Portodomouros"

<http://ropdogotal.ciccp.es>



"Repair works in two dams concret with problems of expansion in concret"



"Reparación del aliviadero de una presa de materiales sueltos"



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Torrejón-Tiétar*

Código:

602

País:

España

Situación en el mapa:

E-5

Comunidad autónoma:

Extremadura

Provincia:

Cáceres

Termino municipal:

Serradilla y Toril

Río:

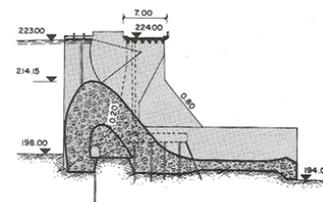
Tiétar

Cuenca hidrográfica:

Tajo

Destino:

Energía



Propietario:

Iberdrola Generación

Proyectista:

M. Castillo y D.Mndez Boudes

Constructor:

Hidrola y Agromán

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

30

227

7,0

75.000

22

219

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

2.600

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1967

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Diagnóstico

Tipo de reacción

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

La bibliografía disponible es de propiedad intelectual de Iberdrola Generación



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Paso Nuevo

Código:

639

País:

España

Situación en el mapa:

K-3

Comunidad autónoma:

Aragón

Provincia:

Huesca

Termino municipal:

Benasque

Río:

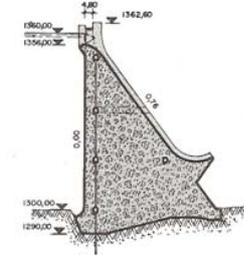
Esera

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía



Propietario:

Energías de Aragón

Proyctista:

R. Conejos

Constructor:

O.C.I.S.A.

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

73

195

4,8

115.000

3

20

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

330

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

1966

Año terminación construcción:

1969

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:



Tipo de árido:

calcitas y pizarras

Estudios sobre los áridos



Tipo de conglomerante:



Estudios sobre el cemento



Procedencia del agua:



Ubicación central de hormigón:



Estudios de Hormigón



Estudios sobre el agua



EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Impermeabilización 1968-1970

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas

Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas



Localización del daño

Cuerpo de presa

Diagnóstico

Tipo de reacción

Ataque sulfático interno

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Hipótesis de partida del comportamiento de la presa de Paso Nuevo"

<http://www.spancold.es>



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Almendra*

Código:

645

País:

España

Situación en el mapa:

D-3

Comunidad autónoma:

Castilla y León

Provincia:

Salamanca



Termino municipal:

Almendra

Río:

Tormes

Cuenca hidrográfica:

Duero

Destino:

Energía

Propietario:

Iberdrola Generación

Proyctista:

P. Guinea

Constructor:

D.E.Z.E.A.

PROYECTO

Tipología:

Bóveda-cúpula

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

202

567

10,0

2.186.000

2.649

8.650

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

3.000

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1970

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmegos Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

1 bloque

Diagnóstico

Tipo de reacción

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

"Presa de almendra puesta en obra del hormigón

<http://ropdogotal.ciccp.es>



La bibliografía disponible es de propiedad intelectual de Iberdrola Generación



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Rumedo

Código:

682

País:

España

Situación en el mapa:

K-2

Comunidad autónoma:

Cataluña

Provincia:

Lérida

Termino municipal:

Lladorre

Río:

Rumedo

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía

Propietario:

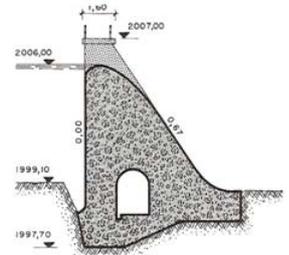
Endesa Generación

Proyctista:

E. La Fuente

Constructor:

C.O.P.I.S.A.



PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

9

91

1,6

3.000

0,6

10

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Lámina libre

Capacidad del aliviadero (m3/s)

65

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1971

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

margen derecho presa

Tipo de árido:

pizarra y granodiorita

Estudios sobre los áridos



Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Ninguna

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

No hay instrumentación y no existen datos

Disponibilidad de estudios

SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Cuerpo de presa

Diagnóstico

Tipo de reacción

Ataque sulfático interno

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título Referencia Documento

La bibliografía disponible es de propiedad intelectual de Endesa Generación



Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES



Nombre Presa:

Salas

Código:

683

País:

España

Situación en el mapa:

C-3

Comunidad autónoma:

Galicia

Provincia:

Orense

Termino municipal:

Muiños

Río:

Salas

Cuenca hidrográfica:

Norte

Destino:

Energía

Propietario:

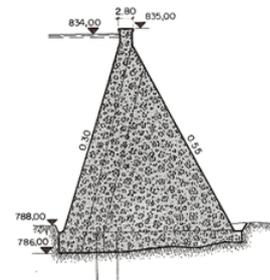
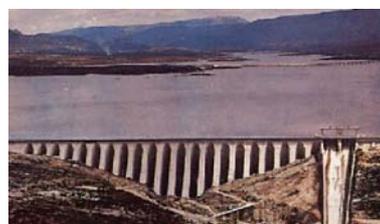
Union Fenosa Generación

Proyctista:

F.E.N.O.S.A

Constructor:

M.Z.O.V



PROYECTO

Tipología:

Contrafuertes

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m3): V. embalse (Hm3) S. embalse (m2)

50

1.005

2,80

76.000

87

686

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Con compuertas

Capacidad del aliviadero (m3/s)

640

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

Año terminación construcción:

1971

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Granitos

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Ninguna

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios



SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas 1975

Edad de la presa al detectarse los síntomas: 4 años

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas

Localización del daño

Cuerpo de presa

Diagnóstico

Tipo de reacción

Álcali-sílice

Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Perido actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título	Referencia	Documento
"Soluciones totales o parciales a los problemas derivados de reacciones tipo álcali-sílice en los hormigones de presas en explotación"	http://www.spancold.es	
"La presa y el aprovechamiento hidroeléctrico del río Salas"	http://ropdogotal.ciccp.es	
"Concrete cracking in two dams"		
"dam ageing caused by concrete expansive troubles"		
"Repair works in two dams concret with problems of expansion in concret"		
"Safety assesment in concret dams"		
"Safety for concret dams"		
"Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice"		



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones





Base de datos de presas de hormigón con expansiones



DATOS GENERALES

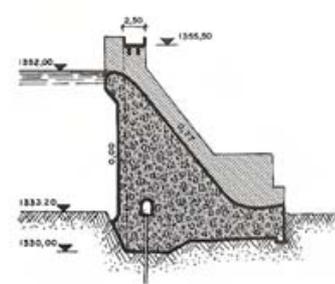


Nombre Presa:

Graus

Código:

713



País:

España

Situación en el mapa:

K-2

Comunidad autónoma:

Cataluña

Provincia:

Lérida

Termino municipal:

Lladorre

Río:

Tavascán

Cuenca hidrográfica:

Ebro

Destino:

Energía

Propietario:

Endesa Generación

Proyctista:

Serrano Camarasa

Constructor:

C.O.P.I.S.A.

PROYECTO

Tipología:

Gravedad recta

Tipo cerrada: Altura (m): L. coronación (m) Ancho coronación (m): V. presa (m³): V. embalse (Hm³) S. embalse (m²)

U

28,90

99,5

2,5

15.000

0,3

5

Estudios geológicos

Esquema de la presa (planos)

Galerías

Compuertas

Desagüe de fondo



Tipo de aliviadero:

Lámina libre

Capacidad del aliviadero (m³/s)

205,000

CONSTRUCCIÓN /MATERIALES

Año inicio construcción:

1968

Año terminación construcción:

1971

Método constructivo:

Bloques

Procedencia del árido:

Tipo de árido:

Estudios sobre los áridos

Tipo de conglomerante:

Estudios sobre el cemento

Procedencia del agua:

Ubicación central de hormigón:

Estudios de Hormigón

Estudios sobre el agua

EXPLOTACIÓN

Actuaciones asociadas a la explotación ordinaria:

Impermeabilización y sellado de fisuras

Periodo actuación:

Instrumentación

Termómetros Defórmómetros Medidores de junta Extensómetros
Piezómetros Péndulos Limnígrafos Otros

Tipo análisis datos:

Comparación estadística con método numérico

Disponibilidad de estudios



SÍNTOMAS/DIAGNÓSTICO EXPANSIÓN

Síntomas

Año detección síntomas Edad de la presa al detectarse los síntomas:

Fisuración orientada Fisuración mapeada Cambios de coloración
Cerramiento de juntas Filtraciones Productos de reacción
Movimientos remanentes Incidencias en órganos móviles Análisis de obras del entorno

Disponibilidad de informes relacionados con los síntomas



Localización del daño

Diagnóstico

Tipo de reacción Disponibilidad de informes

ACTUACIONES PRINCIPALES

Ninguna intervención Abandono de la presa Sellar/inyectar fisuras
Realizar juntas Rehacer juntas Sustitución hormigón
Realizar Anclajes Realizar cortes hormigón Impermeabilizar
Imprimación Ajuste órganos afines

Disponibilidad de informes

Periodo actuaciones



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones



Bibliografía

Título	Referencia	Documento
“Diagnosis of the behaviour of the Graus and Tabescán dams”.	http://www.icold-cigb.net/	
“Aggragate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model.”		
“Agregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack.”		
“Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura.”	http://www.spancold.es	
“Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain.”		
“Funciones de ajuste del comportamiento de expansiones en hormigón de presas.”	http://www.taylorandfrancis.com/default.asp	
“Análisis del comportamiento estructural del hormigón: de la micro a la macro estructura. Aplicación al caso de presas”.	http://www.e-ache.net/articulos_detalle.asp?id=87	
“Efeitos da pirrotita presente nos agregados empregados no concreto de barragens.”	http://www.ibracon.org.br/congresso/47cbc/index.php	
"Metodología en el diagnóstico del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán"		
“Estudio del comportamiento de presas de hormigón frente al ataque sulfático.”	http://e-ache.com/	



PRINCIPIA

Base de datos de presas de hormigón con expansiones

