



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE TESTIGOS DE PRESAS CON
PROBLEMAS EXPANSIVOS

Autor

Eduardo E. Fernández de Castro Suárez

Tutores

Sergio H. Píalarissi Cavalaro
Antonio Aguado de Cea
Ignacio Segura Pérez

Intensificación

Patologías de Estructuras

Fecha

Junio de 2012



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE TESTIGOS DE PRESAS CON
PROBLEMAS EXPANSIVOS

Autor

Eduardo E. Fernández de Castro Suárez

Tutores

Sergio H. Píalarissi Cavalaro
Antonio Aguado de Cea
Ignacio Segura Pérez

Intensificación

Patologías de Estructuras

Fecha

Junio de 2012

RESUMEN

Algunas de las presas construidas en el área de Cataluña presentan daños debido a procesos expansivos que se desarrollan en hormigón, como es el caso de la presa de Graus. Existen diagnósticos previos de esta presa que apuntan a una principal causa de los movimientos observados, es la reacción sulfática interna causada por la oxidación de los sulfuros de hierro presentes en el árido usado. No obstante, las simulaciones numéricas de los movimientos de la presa indican que puede haber un segundo mecanismo expansivo, diferido en el tiempo, que también contribuye para la aparición de los daños. Teniendo eso en cuenta, los objetivos del presente estudio es elaborar una metodología que sirva como propuesta general para la caracterización de testigos en presas y también realizar un nuevo diagnóstico de la presa de Graus para determinar las reacciones que efectivamente contribuyen al proceso expansivo. Para ello, inicialmente se realizó la inspección visual y se identificaron zonas críticas en la presa desde el punto de vista del daño. En esas zonas se llevó a cabo la extracción de testigos los cuales serán sometidos a una amplia caracterización (inspección visual, tinción selectiva, caracterización de porosidad, ensayos de ultrasonido y determinación de permeabilidad al O_2) para confirmar las causas reales del proceso expansivo. Los resultados obtenidos en ese estudio servirán como base para realizar previsiones más precisas del comportamiento de la presa de Graus.

SUMMARY

Some of the dams built in the region of Cataluña, have expansive processes that take place within its concrete, which is the case of the Graus dam. In this dam, observed movements are related in previous diagnoses to an internal sulfate reaction caused by the oxidation of iron sulfides present in the used aggregates. However, numerical simulations of the movements of the dam indicate that there may be a second expansive mechanism, delayed in time, which also contributes to these damages. With that in mind, the objectives of this study are to develop a methodology that serves as a general proposal to characterize concrete cores in dams, and also make a new diagnosis of the Graus dam to determine the reactions that effectively contributes to the expansion process. To do this, visual inspection was performed first, then critical areas in the dam where identified from the point of view of the damage. In these areas, extraction of concrete cores were realized and will be used in an extensive characterization process (visual inspection, selective dyeing, characterization of porosity, ultrasound tests and determination of permeability in O_2) to confirm the real causes of the expansion. The results obtained in this study will serve as the foundations for more accurate diagnosis of the behavior of the Graus dam.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mis tutores Sergio H. Pialarissi Cavalaro e Ignacio Segura, por su apoyo y por todo lo que he aprendido de ellos. A Sergio por recibirme en Barcelona siendo mi tutor desde el primer día, darme la oportunidad y motivación de realizar esta tesis final de máster. A Ignacio por la paciencia que ha tenido conmigo, por la motivación para seguir adelante siempre y sobre todo por haberme ayudado con todo el conocimiento de la química del hormigón.

De igual manera me gustaría dar las gracias al personal de laboratorio de estructuras, especialmente a Tomás García, por haber sido paciente y estar siempre dispuesto a facilitarme todo lo que he necesitado para la parte práctica de mi tesis.

También quisiera agradecer a la Profesora Amparo Moragues, del Laboratorio de Química de la E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid – UPM y al Dr. José Javier Anaya del Centro de Acústica Aplicada y Evaluación No Destructiva CAEND – UPM/CSIC, por realizar la determinación de la permeabilidad al O₂ y la caracterización ultrasónica respectivamente de las muestras, cuyos resultados forman una parte importante en el alcance de los objetivos. Por otra parte, quiero agradecer a la compañía Endesa S. A. por facilitar la extracción de los testigos de la presa de Graus.

Estos mismos agradecimientos debo reconocérselos a mis compañeros de máster por las vivencias compartidas y la complicidad, en particular a Francis Leguisamon, Ronnie Maldonado, Ricardo Rosado, Felipe Solano, Andreina Valbuena, Eduardo Abellana, Alejandra López, y otros más que se han sido parte esencial del grupo durante este año y medio.

Quiero agradecer de forma especial a mis compañeros de piso Guillermo González y Cecilia Páez, por ser quiénes son y brindarme alegría y compañía.

Paso a agradecer a aquellos eternos amigos, que siempre han estado conmigo algunos incluso en la distancia: Julio Pichardo, Aldo Marranzini, David Ferrer, Érika Ahm Paliza, Raúl Betances, Giancarlo Jiménez, Ángel Ramos, son los mejores amigos que he tenido en mi vida.

Por último quería agradecer a mi querida familia: a mi madre por preocuparse siempre por mí, y por haberme ayudado tantas veces sin nunca pedir nada a cambio. A mi padre por apoyarme y querer lo mejor para mí, y a mi hermana por siempre estar pendiente y estar siempre a la disposición de ayudar a todos.

ÍNDICE

1.- CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Motivación	5
1.3.- Objetivos	5
1.3.1.- Objetivo general.....	5
1.3.2.- Objetivos específicos	5
1.4.- Contenido del documento.....	6
2.- CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1.- Introducción.....	7
2.2.- Objetivos	8
2.3.- Reacciones Expansivas del hormigón.....	8
2.3.1.- Reacciones álcali-sílice (ASR).....	10
2.3.2.- Ataque sulfático	24
2.4.- Sintomatología de las reacciones expansivas en hormigones de presas.....	28
2.5.- Campañas experimentales en presas	31
2.5.1.- Instrumentaciones de presas.....	31
2.5.2.- Extracción de testigos de hormigón en presas	33
2.6.- Antecedentes presa de Graus.....	34
3.- CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	39
3.1.- Introducción.....	39
3.2.- Objetivos	39
3.3.- Metodología general de caracterización de los testigos.....	40
3.3.1.- Definición del plan de extracción de testigos:	40
3.3.2.- Extracción de testigos y documentación:.....	43
3.3.3.- Transporte y levantamiento de información:	43
3.3.4.- Planificación de ensayos:	44
3.3.5.- Inspección visual:.....	46
3.3.6.- Rotulación y Corte:	47
3.3.7.- Documentación fotográfica:	48
3.3.8.- Tinción selectiva:	49

3.4.- Metodología para el análisis de imagen.	51
3.4.1.- Muestras sin tinción.	51
3.4.2.- Muestras con tinción.	52
4.- CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE MUESTRAS	57
4.1.- Introducción.....	57
4.2.- Objetivos	57
4.3.- Análisis de imagen	58
4.3.1.- Muestras sin tinción	58
4.3.2.- Muestras con tinción	73
4.4.- Resultados de los ensayos.....	81
4.4.1.- Ensayo de densidad y porosidad.....	81
4.4.2.- Ensayo de permeabilidad al O ₂	84
4.4.3.- Ensayos de ultrasonido.....	85
5.- CAPÍTULO 5 PROPUESTA METODOLÓGICA	91
5.1.- Introducción.....	91
5.2.- Objetivos	92
5.3.- Propuesta metodológica.....	92
5.3.1.- Definición del plan de extracción de testigos:	92
5.3.2.- Extracción de testigos y documentación:	93
5.3.3.- Transporte y levantamiento de información:	93
5.3.4.- Planificación de ensayos:	94
5.3.5.- Inspección visual:.....	94
5.3.6.- Rotulación y Corte:	95
5.3.7.- Documentación fotográfica:	96
5.3.8.- Tinción selectiva:	96
6.- CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	97
6.1.- Introducción.....	97
6.2.- Conclusión general.....	97
6.3.- Conclusiones específicas	¡Error! Marcador no definido.
6.4.- Líneas de investigación futuras	99
7.- REFERENCIAS	101
8.- ANEJOS.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.- NÚMERO DE PRESAS AFECTADAS POR EXPANSIÓN EN EL MUNDO.	3
FIGURA 1.2.- EFECTOS EXPANSIVOS EN PRESAS EN ESPAÑA.	3
FIGURA 1.3A, B.- IMÁGENES DE SATÉLITE CON LA UBICACIÓN DE LA PRESA.	4
FIGURA 2.1.- EJEMPLOS DE EQUILIBRIO.	12
FIGURA 2.2.- MODELO IDEALIZADO DE CÓMO PUEDEN INDUCIRSE LAS FISURAS CAUSADAS POR LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE.	13
FIGURA 2.3.- MODELO IDEALIZADO DE MICRO Y MACROFISURAS CAUSADAS POR LA REACCIÓN ÁLCALI- SÍLICE EN HORMIGÓN.	14
FIGURA 2.4.- ATAQUE DE LOS ÁLCALIS EN SÍLICE BIEN CRISTALIZADA (A) Y EN SÍLICE AMORFA (B).	15
FIGURA 2.5.- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ÁRIDOS REACTIVOS FRENTE A LA EXPANSIÓN.	17
FIGURA 2.6.- RELACIÓN EXPANSIÓN – TIEMPO.	18
FIGURA 2.7.- EFECTO PÉSIMO.	19
FIGURA 2.8.- RELACIÓN EXPANSIÓN – EDAD.	21
FIGURA 2.9.- RELACIÓN ENTRE EXPANSIÓN Y EL TIEMPO CON RESPECTO AL CONTENIDO DE ÁLCALI DEL CEMENTO.	22
FIGURA 2.10.- EFECTO DE LOS CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE ÁLCALIS DEL CEMENTO CON RELACIÓN A LA EXPANSIÓN.	23
FIGURA 2.11A, B.- IMÁGENES DE MEB (A. ETRINGITA Y B. TAUMASITA).	25
FIGURA 2.12.- INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA HUMEDAD EN EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE O ₂ , (TUUTTI, 1982).	27
FIGURA 2.13A, B.- PRESA DE GRAUS: A) ESTRUCTURA AUXILIAR B) ACCESO A LA GALERÍA DE LA PRESA.	29
FIGURA 2.14.- MOVIMIENTOS DE NIVELACIÓN MEDIDOS EN LA PRESA DE GRAUS, (ARAUJO, 2008).	29
FIGURA 2.15.- MOVIMIENTOS DE ALINEACIÓN MEDIDOS EN LA PRESA DE GRAUS, (ARAUJO, 2008).	30
FIGURA 2.16.- ORGANIGRAMA DEL CICLO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA GENERAL, (PARDO, 2009).	32
FIGURA 2.17.- EXTRACCIÓN DE TESTIGO DENTRO DE UNA GALERÍA DE PRESA (ATI, EMPRESA ESPAÑOLA).	34
FIGURA 2.18.- ALZADO DE LA PRESA CON LOS RESPECTIVOS BLOQUES DE HORMIGONADO, (OLIVEIRA, 2011).	35
FIGURA 2.19.- SECCIÓN DEL BLOQUE 5 DE LA PRESA DE GRAUS, (OLIVEIRA, 2011).	35
FIGURA 2.20.- FISURACIÓN EN RAMADA EN PARAMENTOS AGUAS DEBAJO DE LA PRESA DE GRAUS, (AGUADO ET AL., 1993).	36
FIGURA 3.1.- PASOS DE LA METODOLOGÍA GENERAL DE CARACTERIZACIÓN DE TESTIGOS. .	40
FIGURA 3.2.- SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA PRESA DE GRAUS.	3-41

FIGURA 3.3.- DETALLE EN PLANTA DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS PERFORACIONES DE LA PRESA DE GRAUS.....	3-42
FIGURA 3.4.- SECCIÓN TRANSVERSAL MOSTRANDO LA UBICACIÓN DE LOS TESTIGOS EN EL PARAMENTO AGUAS ABAJO.....	3-42
FIGURA 3.5.- CORTADORA DE PROBETAS DE HORMIGÓN UTILIZADA PARA SECCIONAR LOS TESTIGOS.	45
FIGURA 3.6.- TESTIGO COMPLETAMENTE ENSAMBLADO SOBRE LA MESA DE TRABAJO. DETRÁS SE MUESTRA EL CONTENEDOR DE DONDE FUE ALMACENADO Y TRANSPORTADO.....	47
FIGURA 3.7.- ESCALA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS CON TINCIÓN DE SULFATOS.	53
FIGURA 3.8.- IMAGEN DE LA TINCIÓN DEL PH QUE PRESENTA HALOS DECOLORADOS ENTORNO A LOS ÁRIDOS.	54
FIGURA 3.9.- IMAGEN QUE MUESTRA LA TINCIÓN DEL CALCIO CON ALGUNOS POROS E INTERFAZ COLOREADA DE COLOR ROSA.....	55
FIGURA 3.10.- IMAGEN DE UNA MUESTRA DE TINCIÓN DE POTASIO, CON FISURAS EN LA INTERFAZ TEÑIDAS DE COLOR AMARILLO.....	56
FIGURA 4.1.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE COQUERAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 5.	68
FIGURA 4.2.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE COQUERAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4.	68
FIGURA 4.3.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE COQUERAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS ASCENDENTES EN GALERÍA DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4 Y 5.	69
FIGURA 4.4.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE COQUERAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DESCENDENTES EN GALERÍA DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4 Y 5.....	69
FIGURA 4.5.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 5.	71
FIGURA 4.6.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4.	71
FIGURA 4.7.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS ASCENDENTES EN GALERÍA DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4 Y 5.72	
FIGURA 4.8.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DESCENDENTES EN GALERÍA DEL BLOQUE DE HORMIGONADO 4 Y 5.	72
FIGURA 4.9.- GRÁFICA DE LA TINCIÓN DE SULFATOS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DEL BLOQUE 4 Y 5.	75
FIGURA 4.10.- GRÁFICA DE LA TINCIÓN DE SULFATOS DE LOS TESTIGOS DE GALERÍA DEL BLOQUE 4 Y 5.	75
FIGURA 4.11.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS DE COLOR AMARILLO PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO DE AMBOS BLOQUES.....	80

FIGURA 4.12.- GRÁFICA DE LA CANTIDAD DE FISURAS DE COLOR AMARILLO PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE LOS TESTIGOS DE GALERÍA DE AMBOS BLOQUES.	80
FIGURA 4.13.- GRÁFICA DEL ENSAYO DE POROSIDAD DE LOS TESTIGOS DE PARAMENTO... ..	83
FIGURA 4.14.-.- GRÁFICA DEL ENSAYO DE POROSIDAD DE LOS TESTIGOS DE GALERÍA.	83
FIGURA 4.15.- MAPA DE AMPLITUD DIAMETRAL.	86
FIGURA 4.16.- MAPA DE AMPLITUD AXIAL.	87
FIGURA 4.17.- MAPA DE VELOCIDAD DIAMETRAL.	87
FIGURA 4.18.- MAPA DE VELOCIDAD AXIAL.	88
FIGURA 4.19.- MAPAS DE ALTURAS AXIALES.	88
FIGURA 5.1.- PASOS DE LA METODOLOGÍA GENERAL DE CARACTERIZACIÓN DE TESTIGOS.. ..	92

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1.- MINERALES, ROCAS Y OTRAS SUSTANCIAS POTENCIALMENTE NOCIVAS REACCIONANDO CON LOS ÁLCALIS DEL CEMENTO. (ESTA LISTA NO ES EXHAUSTIVA)	16
TABLA 2.2.- CLASE DE PRESAS SEGÚN INSTRUMENTACIÓN (LOMBARDI, 2006).	32
TABLA 4.1.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B5L. 4-59	
TABLA 4.2.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B4L. 4-60	
TABLA 4.3.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B5R. 4-61	
TABLA 4.4.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B4R. 4-62	
TABLA 4.5.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B5A. 4-63	
TABLA 4.6.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B5D. 4-64	
TABLA 4.7.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B4A. 4-65	
TABLA 4.8.- DESCRIPCIÓN TABULADA DE LAS MUESTRAS SIN TINCIÓN DEL TESTIGO B4D. 4-66	
TABLA 4.9.- DATOS OBTENIDOS DE LA TINCIÓN DE SULFATOS.....	74
TABLA 4.10.- DATOS OBTENIDOS DE LA TINCIÓN DEL PH.....	77
TABLA 4.11.- DATOS OBTENIDOS DE LA TINCIÓN DEL CALCIO.....	78
TABLA 4.12.- DATOS OBTENIDOS DE LA TINCIÓN DEL POTASIO.....	79
TABLA 4.13.- DATOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD Y POROSIDAD. .	82
TABLA 4.14.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL O ₂	84

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

En la historia de la humanidad, las presas han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo social y económico. La primera presa que se tiene registro consistía de un bloque macizo de piedra construida en el año 3000 A.C. para acumular el agua necesaria al abastecimiento de la ciudad de Jawa en Jordania (Helms, 1977). El siguiente registro aparece en Egipto con la presa de Sadd el-Kafara erigida en el año de 2650 A.C. para controlar el régimen de inundaciones del río Nilo cerca de Wadi Garawi. Desde entonces, se han construido diversas estructuras similares que respondían a la necesidad de regularizar caudales de ríos, dirigir el agua hacia canales de irrigación, acumular agua para períodos de sequía, y en los últimos siglos, generar energía hidroeléctrica.

A pesar de sus aspectos positivos y del avance tecnológico potenciado por esas estructuras, las presas suelen tener un gran impacto social, económico y medioambiental, ya que su construcción implica en el desplazamiento de familias, la pérdida de sitios arqueológicos y un cambio ecológico importante con la creación de los embalses. Frente a los impactos mencionados y al importante nivel de inversión requerido para la construcción de las presas, es fundamental asegurar que esas estructuras se mantengan en buen estado durante largos períodos, con un nivel razonable de mantenimiento. Así, se deben identificar con la debida antelación las posibles causas de los posibles daños que suelen surgir a lo largo de la vida de la estructura, tratándolos de forma adecuada.

Según Del Hoyo & Casafont (1992), esos daños son resultado del envejecimiento del hormigón que puede presentarse bajo cinco aspectos principales:

inestabilidad dimensional, lixiviación del material, acción del hielo, fisuración y envejecimiento del pretensado de anclajes. Entre los aspectos mencionados, el que suele ser más común en presas de hormigón es la inestabilidad dimensional, que se origina en la mayoría de los casos por fenómenos expansivos de origen interno en el hormigón. Esos fenómenos se producen de manera no uniforme generando tensiones internas que pueden dar lugar a fisuras y a la aceleración de la degradación de la estructura.

Las reacciones álcali-árido son reacciones que ocurren entre los álcalis (iones OH^-) de la pasta del hormigón y los reactivos que pudieran tener los áridos usados en su elaboración. Los álcalis aportan alcalinidad al hormigón, y dependiendo qué tipo de álcalis y con qué tipo de reactivos reaccionen, éstos presentan características distintas. Entre las reacciones álcali-árido, la más común es la reacción álcali-sílice (RSA).

Mencionando casos de reacciones expansivas del hormigón, usualmente encontramos reacciones del tipo álcali-sílice (RAS), álcali carbonato (RAC), sulfática externa (RSE) y sulfática interna (RSI). En la RAS y en la RAC, los álcalis presentes en el cemento hidratado reaccionan con la sílice activa y con los carbonatos encontrados en los áridos, respectivamente. Como resultado se obtienen productos que tienen un comportamiento expansivo en presencia de elevada humedad. En la RSE y en la RSI, la expansión es consecuencia de la formación de etringita secundaria, originada por la presencia de sulfatos. En la RSE, los sulfatos son aportados por fuentes externas al hormigón, como el agua subterránea, el agua marina o los suelos, mientras que en la RSI dichos sulfatos son derivados de la oxidación de los sulfuros de hierro presente en los áridos.

La *Figura 1.1* presenta los datos actualizados de un estudio realizado por Segarra Foradada (2005), obtenidos a partir de la base de datos de ACRES, donde han sido catalogadas presas con expansión en todo el mundo. En ella se aprecia que un 13% (15) de las presas catalogadas con problemas expansivos se encuentra en España. Ese elevado porcentaje pone de manifiesto la relevancia que el fenómeno expansivo en dicho país tiene a nivel mundial. Del total de 113 presas con expansión mostradas en la *Figura 1.1*, 98 presentan expansiones debido a RAS, 3 tienen RAC, 6 están sobre investigación, 2 presentan otros factores expansivos y 6 están afectadas por la RSI.

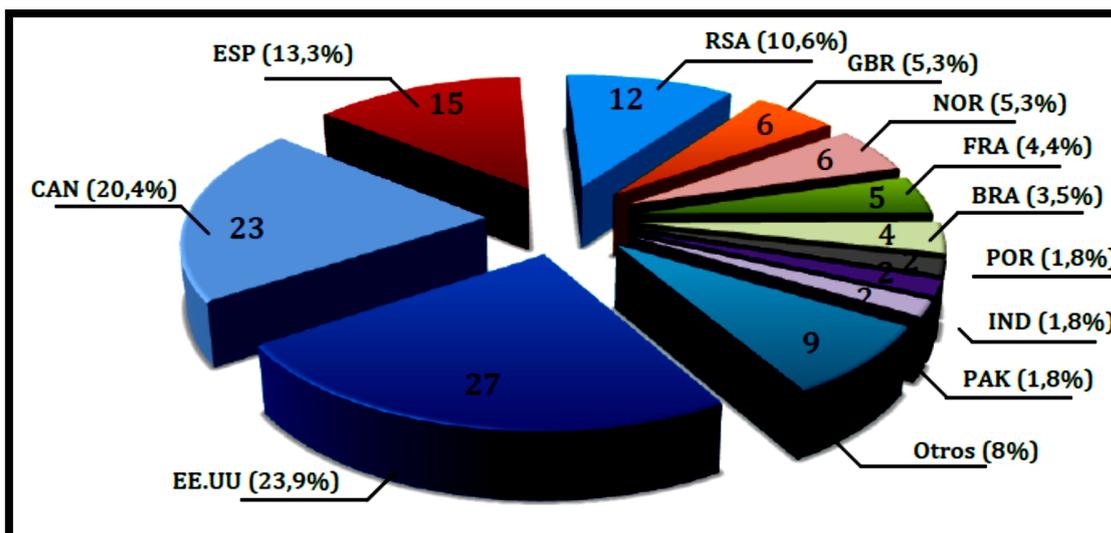


Figura 1.1.- Número de presas afectadas por expansión en el mundo.

La figura 1.2 muestra el desglose de los 15 casos que existen en España en función del tipo de reacciones diagnosticadas. Aunque el porcentaje total de casos con RSI (5%) es bajo se compara con el total de presas con RAS (87%), la primera puede tener una importancia local elevada. En ella se verifica que, de los 6 casos de presas con RSI en el mundo, 5 han sido documentados en España, con excepción de la presa de Río Descuberto en Brasil, (Rodrigues Andriolo, 2007). Asimismo, se observa que del total de presas documentadas con problemas expansivos en España, un 33% presentan RSI y un 27% están afectadas por la RAS. Eso refuerza la importancia y la elevada repercusión que tienen los estudios de la RSI y de la RAS a nivel nacional.

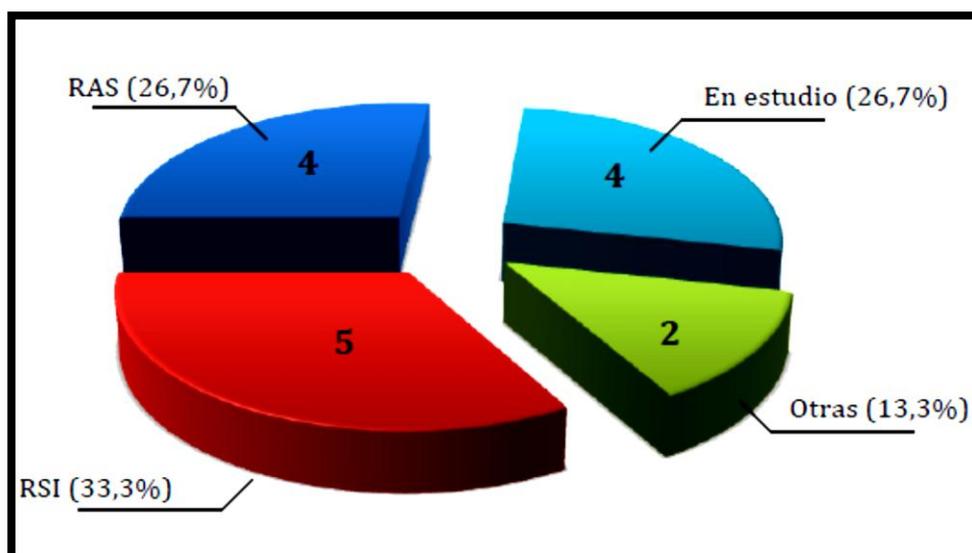


Figura 1.2.- Efectos expansivos en presas en España.

En esta tesis, nuestro caso de estudio es la presa de Graus. La presa de Graus es una presa de hormigón de tipo gravedad ubicada en España en el término municipal de Lladorre en la provincia de Cataluña. Fue construida entre 1968 y 1971 sobre el río Tabescán, perteneciente a la cuenca de Ebro. En las *figuras 1.3a y 1.3b*, se muestran imágenes de satélite con la ubicación de la presa.



Figura 1.3a, b.- Imágenes de satélite con la ubicación de la presa.

Por medio de la instrumentación presente en ella, se ha ido observando movimientos y deformaciones remanentes a lo largo de la vida útil de la presa. Las deformaciones y movimientos están acompañados de fisuraciones en distintas zonas de la estructura. Por esto, la presa de Graus ha sido caso de estudio de muchos trabajos de investigación. En investigaciones anteriores, se ha llegado a la conclusión de que las patologías que esta presa padece son producto de reacciones expansivas del hormigón utilizado en su construcción, más concretamente la presencia de reacción sulfática interna (RSI).

En cuanto a los estudios previos que tratan esta presa, están: “Estudio del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán” en 1993 y “Reacción sulfática interna en presas de hormigón: cinética del comportamiento” en 2011. Ambos estudios tratan la reacción sulfática interna de la presa. Sin embargo, solo contemplando la reacción sulfática interna, los intentos de modelización de los movimientos de esta presa no predicen los valores que arrojan los valores registrados por la instrumentación de la presa, lo que sugiere que esta padece de una segunda reacción expansiva.

Por esta causa, se ha elegido la presa de Graus para ser el caso de estudio y la base para elaborar una propuesta metodológica de caracterización de testigos de hormigón en presas con problemas expansivos.

1.2.- Motivación

Las presas de hormigón siempre han sido estructuras que representan un gran impacto en la sociedad y la naturaleza. Por eso, conocer las condiciones de servicio que se encuentran, es de sumo interés para la seguridad de todo aquello que pueda ser afectado por la falla de estas inmensas estructuras. Entre las principales causas del deterioro de las presas están las que tienen que ver con el propio hormigón y las reacciones que se producen en él a través de los años, como por ejemplo es el caso de las reacciones expansivas. Diagnosticar a tiempo su presencia y la amplitud de su influencia, permitiría prevenir cualquier daño o afectación a todo lo que pudiera ser impactado por esta gran estructura.

La ausencia de metodologías detalladas para el diagnóstico preciso de las causas de estos procesos expansivos, puede llevar a una previsión poco realista de su evolución en el tiempo, conduciendo a tratamientos y reparaciones poco efectivas, menos seguridad para la sociedad y mayores costes de mantenimiento en la vida útil de la estructura.

La diversidad de metodologías y métodos para caracterizar reacciones expansivas, así como las problemáticas que pueden tener lugar durante el proceso de extracción y tratamiento de testigos justifican la necesidad de desarrollar métodos para la caracterización de testigos en presas. En esta tesina desarrollaremos un método práctico, que sirva como una propuesta metodológica para evaluar y diagnosticar las patologías existentes en los hormigones de presas. En el caso concreto de esta tesina, se tomará como ejemplo la presa de Graus para implementar los ensayos necesarios para diagnosticar las reacciones expansivas que existen como patologías en esta presa.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- *Objetivo general*

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, el objetivo de la presente Tesis Final de Máster es confirmar los diagnósticos previos para determinar las reacciones que efectivamente contribuyen el proceso expansivo en el hormigón de la presa de Graus, y así desarrollar un protocolo que sirva como procedimiento sistemático para las campañas experimentales de caracterización de presas con patologías de hormigón expansivo.

1.3.2.- *Objetivos específicos*

Para alcanzar el objetivo general se proponen algunos objetivos específicos, detallados a continuación.

1. Comprobar la existencia de la reacción sulfática interna en el hormigón y acotar su alcance en el cuerpo de la presa
2. Diagnosticar la presencia de una segunda reacción expansiva en el hormigón y acotar su presencia en el cuerpo de presa
3. Elaborar una metodología detallada que sirva de protocolo en las campañas experimentales de diagnóstico en las patologías de presas de hormigón.

1.4.- Contenido del documento

El contenido de esta tesis está dividido en 6 capítulos, del cual el presente es el primero de ellos. En este se introduce al lector en el tema de estudio, pasando desde un punto de vista global a una visión más específica del tema en cuestión.

El segundo capítulo, abarca el estado del conocimiento. En este se presentan los conceptos generales de las reacciones expansivas, la sintomatologías que presentan las presas, las campañas experimentales que se ejecutan, y una descripción de la presa de Graus.

Por otro lado, el tercer capítulo, trata lo que es la metodología que se empleó para elaborar esta tesina. Dentro del capítulo, se detallan la metodología general de caracterización de los testigos de la presa y la metodología que se usó para el análisis de las imágenes obtenidas.

Luego, el capítulo 4, abarca el análisis de lo que es el procesamiento de todas las imágenes obtenidas en la documentación fotográfica, y también de los ensayos realizados a las muestras seleccionadas.

El capítulo 5 se basa en la propuesta de una metodología para la caracterización de testigos en presas, tomando como caso de estudio la presa de Graus. Este capítulo, no es más que una mejora del capítulo 3, corrigiendo o mejorando algunos de mismos pasos utilizados en la metodología empleada.

Por último, está el capítulo 6, el cual tiene por contenido lo que son las conclusiones generales y específicas de esta tesina.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

2.1.- Introducción

Las presas son las más singulares de las obras civiles, teniendo 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 nos podemos encontrar con unas repercusiones, sobre la sociedad, que se pueden considerar menos favorables, por decirlo de alguna manera (inundación de extensas áreas, desplazamiento de poblaciones, eliminación de fauna y flora...), pero sin lugar a dudas 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 la ICOLD, International Commission on Large Dams, la probabilidad de su rotura es 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 las obras ingenieriles, quizás sólo las centrales nucleares pueden ocasionar daños mayores, y por eso se deben estudiar los fenómenos que ocasionan su deterioro.

Centrándonos en las presas de hormigón se puede decir que el deterioro de éstas, puede deberse a causas diversas, como son la acción de 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 internas que pueden prolongarse durante muchos años. Aun 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, (Pardo, 2009).

Por otro lado, 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).

2.2.- Objetivos

En este capítulo se pretenden estudiar los distintos tipos de reacciones expansivas que influyen en nuestro caso de estudio desde un punto de vista general, abordando las reacciones álcali-sílice (ASR) y la reacción sulfática interna (RSI). También se tratarán los factores que pueden influir tanto en la velocidad como en la intensidad de estas reacciones.

Por otro lado, se tratará el tema de las campañas experimentales en presas que se usa actualmente, mencionando los dispositivos de instrumentación utilizados, así como también el proceso de extracción de testigos. Además, en este mismo capítulo, se hablará de los antecedentes de la presa de Graus, así como también una descripción de esta.

2.3.- Reacciones Expansivas del hormigón.

Esta sección pretende introducir al lector de esta Tesis al problema químico, porque 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 del hormigón para mostrar al ingeniero una visión global del porqué de esta patología.

El hormigón es el material resultante de la mezcla de un conglomerante con áridos y con agua, siendo el conglomerante su componente principal. Dentro del conglomerante, su principal componente es el clínker.

El clínker está formado principalmente por cuatro compuestos: dos silicatos, C_3S (silicato tricálcico) y C_2S (silicato bicálcico), y dos aluminatos, C_3A (aluminato tricálcico) 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 que recubre progresivamente los granos de cemento anhidro y genera una estructura con capacidad para desarrollar resistencias mecánicas y fuerzas adhesivas que permiten principalmente la interacción con las armaduras y los áridos.

Unas de las características de la pasta de cemento es su alta alcalinidad (presencia de iones OH^-), conocidos también como álcalis. Su reactividad se puede definir como la reacción química entre la solución intersticial (el líquido de poros y capilares) con un pH superior o igual a 12, e iones alcalinos con fases minerales de los áridos, (Valls, 2011).

Las reacciones químicas de los áridos reactivos constituyentes del hormigón pueden afectar a las estructuras de las que éste forma parte. Algunas reacciones de las que se pueden dar en el hormigón no representan ningún tipo de problema, en algunos casos inclusive podrían llegar a ser beneficiosas para el mismo hormigón, otras en cambio, como las reacciones expansivas pueden generar un deterioro muy importante en éste, y por ende en la estructura, (Pardo, 2009).

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).

Para que ocurran reacciones químicas entre la pasta y los áridos, deben interactuar simultáneamente los siguientes factores:

- Áridos reactivos.
- Humedad relativa superior a 80-85%.
- Una concentración de álcalis alta, crítica.

La estabilidad de los áridos influye directamente en la durabilidad del hormigón, y debe ser de gran preocupación para la industria de la construcción, (Valls, 2011).

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 que se producen según el tipo de árido:

- Reacciones álcali – sílice (ASR)
- Reacciones álcali – carbonato (ACR)
- Ataque sulfático

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.

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-árido puede llegar a considerarse como un fenómeno muy lento y prácticamente inofensivo si no existe imbibición de agua por las zonas de contacto entre el árido y la pasta de cemento.

En este trabajo sólo abarcaremos las reacciones álcali-sílice (ASR) y ataque sulfático, ya que son las que trataremos en nuestro caso de estudio.

2.3.1.- Reacciones álcali-sílice (ASR)

De las reacciones expansivas presentadas, la que más atención ha recibido, sin lugar a dudas, 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-árido. Estudios realizados en años posteriores, Hadley (1964), determinaron que se trataba de una reacción álcali-sílice.

La reacción álcali-sílice (ASR) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-árido. En la fabricación del hormigón, la hidratación del Portland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen.

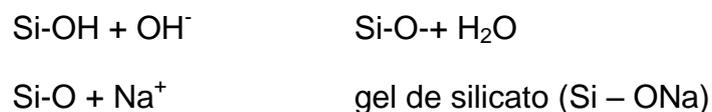
Anteriormente se creía que el mecanismo de la reacción era distinto para las rocas con minerales silíceos cristalizados que para las rocas con estructura más desordenada, distinguiéndose entre reacción álcali – silicato (ASSR) y reacción álcali – sílice (ASR) respectivamente. Sin embargo, se ha demostrado que no es así y que la reacción es la misma, sólo que en función del grado de cristalización de la sílice, la cinética de la reacción varía, dándose más rápidamente cuanto menor es este grado.

La expansión viene causada por la presión osmótica. Los geles de silicato alcalino pueden ejercer grandes presiones de imbibición durante el proceso expansivo, mayores que la resistencia a tracción del hormigón, (Segarra, 2005)

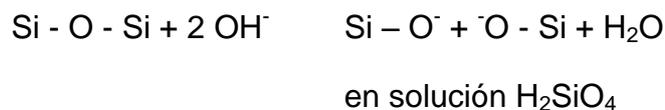
Según el Boletín 79 del ICOLD (1991), las reacciones que se producen son principalmente dos, y lo hacen simultáneamente:

- Reacción 1: Reacción ácido-base, neutralización de los grupos silanol (Si-OH) por la solución alcalina con sosa cáustica $\text{NaOH} = \text{Na}^+ \text{OH}^-$:

En primer lugar el grupo silanol reacciona con el OH^- , y da como producto Si-O-, que al reaccionar con el Na^+ , produce un gel de silicato.



- Reacción 2: Ataque de los puentes de siloxeno por la solución alcalina, lo que provoca una desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos (H_2SiO_4).



Mirando la formulación de estas reacciones, podemos apreciar la importancia que tienen los iones OH^- en las mismas, porque para que se produzcan es primordial la presencia de este ión.

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa.

La reacción cesará pues cuando uno de los reactivos se consume o cuando la concentración de ión hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada. En la *Figura 2.1*, Hobbs (1988), para relaciones agua/cemento y árido/cemento de 0,35 y 1,00 respectivamente, se pueden observar ejemplos donde se establece el equilibrio, ya sea porque la reacción se ha completado, o porque se da el equilibrio físico:

Caso 1: La expansión cesa cuando ya no hay agua disponible.

Caso 2: La expansión se estabiliza cuando se reduce toda la sílice disponible.

Caso 3: La concentración de metal alcalino o la de ión hidroxilo se reduce a un nivel umbral.

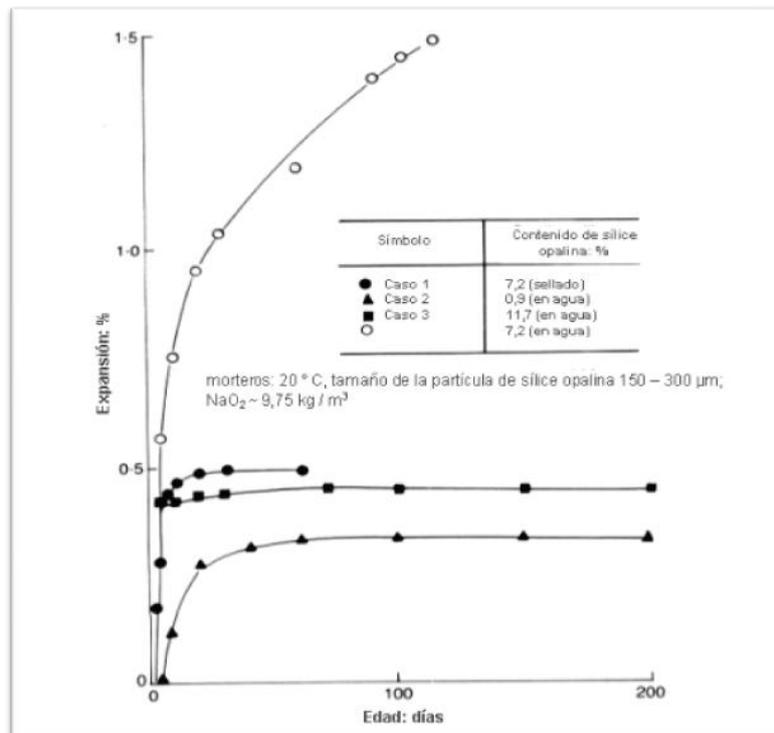


Figura 2.1.- Ejemplos de equilibrio.

Como la expansión causada por la ASR se debe a las tensiones inducidas por el crecimiento del gel al absorber el fluido intersticial, ésta dependerá del volumen de concentración del gel, de su velocidad de crecimiento y de sus propiedades físicas.

Si la velocidad de crecimiento es lenta, las fuerzas internas se disipan por la migración del gel a través del hormigón, mientras que si la velocidad es

relativamente rápida, las fuerzas internas pueden llegar a un nivel en el que pueden ocasionar fisuras y la expansión del hormigón.

En la *Figura 2.2*, Hobbs (1988), se muestran los diferentes niveles de formación de las fisuras debido a las tensiones internas:

- Nivel 1: El gel crece induciendo tensiones internas, pero no se dan microfisuras.
- Nivel 2: Las tensiones inducidas son lo suficientemente grandes para causar microfisuras en la proximidad de las partículas reactivas, sólo ocurre una expansión insignificante
- Nivel 3: El gel migra hacia algunas microfisuras y hay un lento fortalecimiento de las fuerzas internas.
- Nivel 4: Las fuerzas internas inducidas alrededor del gel que llena las microfisuras son lo suficientemente grandes para causar microfisuras extensivas y se pueden producir grandes expansiones.

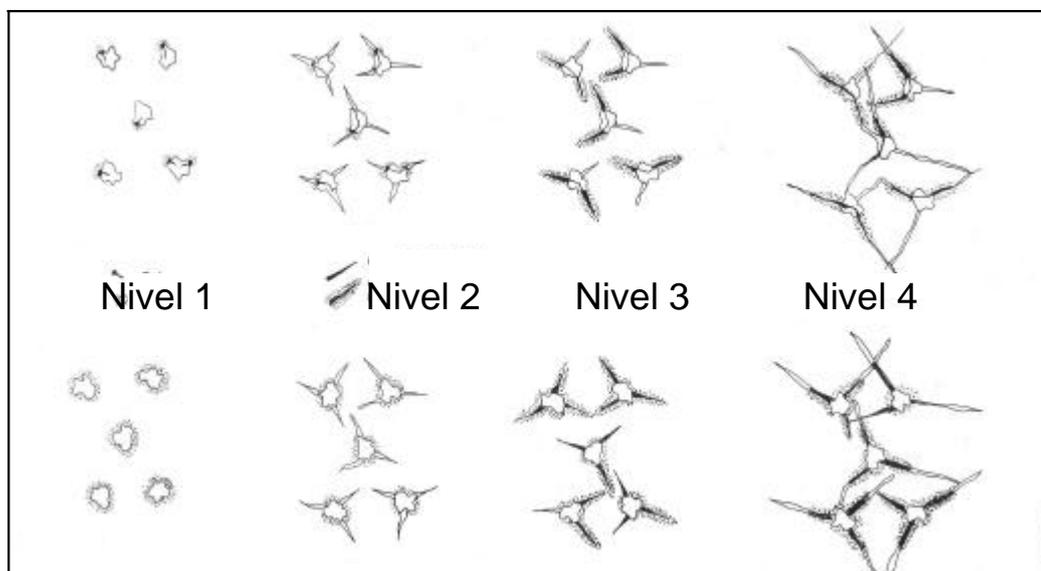


Figura 2.2.- Modelo idealizado de cómo pueden inducirse las fisuras causadas por la reacción álcali-sílice.

En algunas estructuras monitorizadas en Dinamarca, USA y Suráfrica, las fisuras tardaron en aparecer entre 1 y 3,5 años. En el caso de estructuras de hormigón afectadas en el Reino Unido que fueron examinadas en 1976 por la Cement and Concrete Association, el examen petrográfico muestra que las

macrofisuras se han formado probablemente algunos años antes del momento del examen, que en ese momento tenían entre 5 y 7 años.

Como en todos los casos de expansión del hormigón, las fisuras y expansiones causadas por ASR están influenciadas por la geometría de la pieza de hormigón, la presencia de armadura y la carga aplicada.

La anchura de las macrofisuras inducidas por el ASR en la cara expuesta de la pieza de hormigón puede oscilar desde menos de 0,1 mm hasta más de 10 mm en casos extremos. Si la expansión no ha finalizado, las anchuras de las fisuras se incrementarán durante periodos de prolongado tiempo húmedo. Las macrofisuras se localizan normalmente en 25-50 mm de la superficie expuesta de la pieza de hormigón y están alineadas perpendiculares a la superficie expuesta.

Dado que las macrofisuras inducidas por ASR están generalmente restringidas a una profundidad de 50 mm más o menos de la superficie expuesta del elemento de hormigón, puede deducirse que las capas de la superficie han estado sujetas a tensiones y el núcleo del hormigón a compresión, Hobbs (1988).

Consecuentemente más expansión, y por lo tanto reacción, ha ocurrido dentro del núcleo de hormigón que pegado a su superficie expuesta. Un modelo idealizado de posible microfisuras y macrofisuras causado por ASR se muestra en la *Figura 2.3*, Hobbs (1988). Según la experiencia de este mismo autor, en hormigón plano y armado, la profundidad de las macrofisuras según la experiencia es de aproximadamente un décimo del grosor de la pieza.

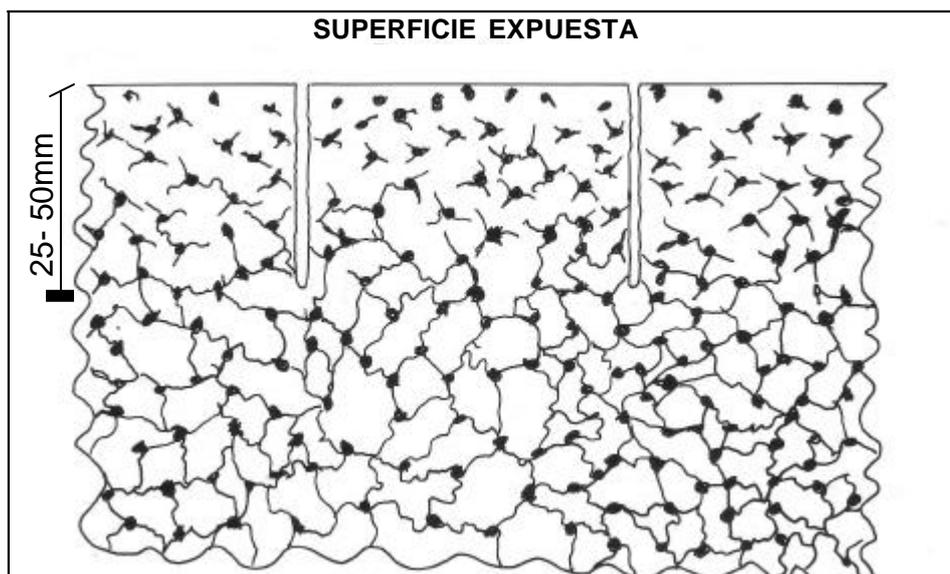


Figura 2.3.- Modelo idealizado de micro y macrofisuras causadas por la reacción álcali-sílice en hormigón.

Entre los factores que influyen en la reacción álcali-sílice destacan los siguientes:

- Propiedades de los áridos: composición, granulometría...
- Propiedades del cemento
- Humedad ambiental
- Temperatura

2.3.1.1.- Propiedades de los áridos

Los áridos que se ven afectados por la ASR, son aquellos que en su composición cuentan con minerales silíceos. Los áridos que componen los hormigones vienen de unas rocas que se encuentran en un estado distinto a sus condiciones naturales, por lo que evolucionarán hasta encontrar un nuevo equilibrio. Esto es lo que se conoce como reactividad, y dependerá tanto de los minerales como de las rocas de las que forman parte estos minerales. Por un lado, dependerá del tipo de mineral, y de su historia tectónica; y por otro, de la estructura, tamaño de los granos, porosidad, permeabilidad de la roca y de la composición de la misma.

Hay que tener en cuenta que a la hora de producirse la reacción, ésta será más rápida en tanto más desordenada sea la estructura del mineral: si la forma de sílice está bien cristalizada o es relativamente densa, el ataque será superficial, mientras que si está pobremente cristalizada los iones hidroxilos y sodio o potasio entrarán en el interior, esto se puede apreciar en *Figura 2.4*, Dent Glasser et al. (1981), en el caso (A) los iones no pueden penetrar y el ataque se reduce a la superficie, lo contrario sucede en el caso (B).

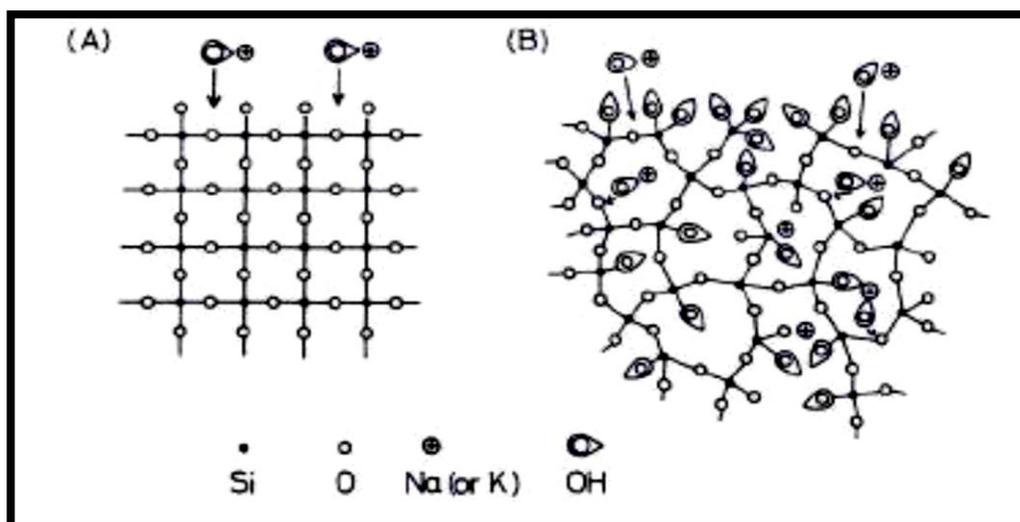


Figura 2.4- Ataque de los álcalis en sílice bien cristalizada (A) y en sílice amorfa (B).

En la *Tabla 2.1*, preparada por el CSIR en Pretoria, se detallan varios de los minerales y rocas potencialmente nocivos para las reacciones álcali-árido:

MINERALES	
Ópalo	
Calcedonia	
Tridimita	
Cristobalita	
Cuarzo vitrificado	Criptocristalino, microcristalino
Cuarzo de grano grueso	Intensamente fracturado, granulado y deformado con incrustaciones submicroscópicas, 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	
Obsidiana	
Toba volcánica	
Basaltos	Cabedonia; 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	
Argillitas	
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.- Minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento. (Esta lista no es exhaustiva)

Efecto pésimo

Si se comparan las expansiones que se producen al variar las proporciones de árido reactivo, se puede observar que se produce un pico para una proporción determinada. Es decir, que el comportamiento que se da es el siguiente: hasta un determinado porcentaje, la expansión aumenta a medida que lo hace el contenido de árido reactivo, pero se llega a un punto a partir del cual, al seguir aumentando la proporción de árido, la expansión disminuye. Esto es lo que se conoce como el efecto pésimo y se puede observar en la *Figura 2.5*, (ICOLD, 1991):

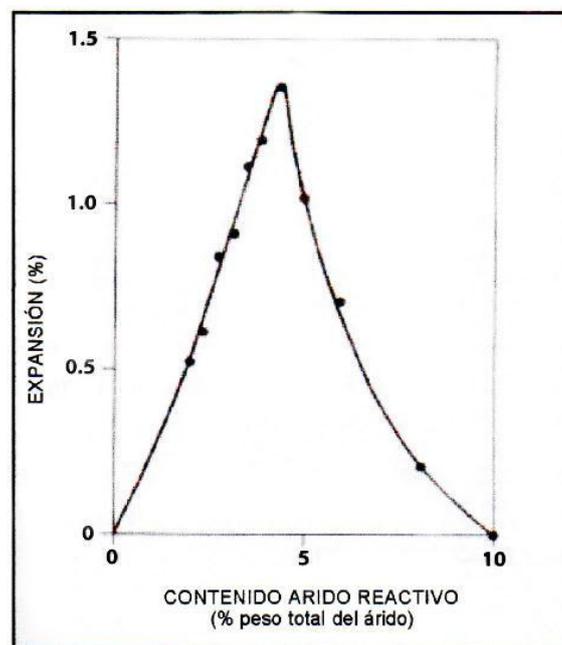


Figura 2.5.- Influencia del contenido de áridos reactivos frente a la expansión.

La cantidad de árido reactivo para la que se produce este pico de la expansión variará en función del tipo de árido con el que nos encontremos: para algunos de alta reactividad como el ópalo, se sitúa en un 3,5 % mientras que para otros menos reactivos la proporción es de un 10 – 20 %.

La explicación que se puede dar a este comportamiento es la siguiente: si la proporción de sílice reactiva en el total de los áridos es pequeña y está libre, será consumida rápidamente por la reacción y la cantidad de gel no será suficiente para provocar daños, mientras que si la proporción es grande, la concentración de iones alcalinos en el agua intersticial se reduce debajo de un cierto nivel durante el tiempo de endurecimiento del hormigón y por consiguiente el volumen de gel formado no provoca una expansión total.

Algo similar ocurre con la relación expansión/tiempo como se puede observar en la *Figura 2.6*, (Hobbs, 1988). Para proporciones muy grandes o muy pequeñas no se dan expansiones, pero si miramos los valores intermedios, la expansión es mayor cuanto menor es la edad de comienzo de las expansiones, es decir, que con la proporción de árido reactivo del efecto pésimo además de comenzar antes a expandirse, esta expansión será la mayor posible.

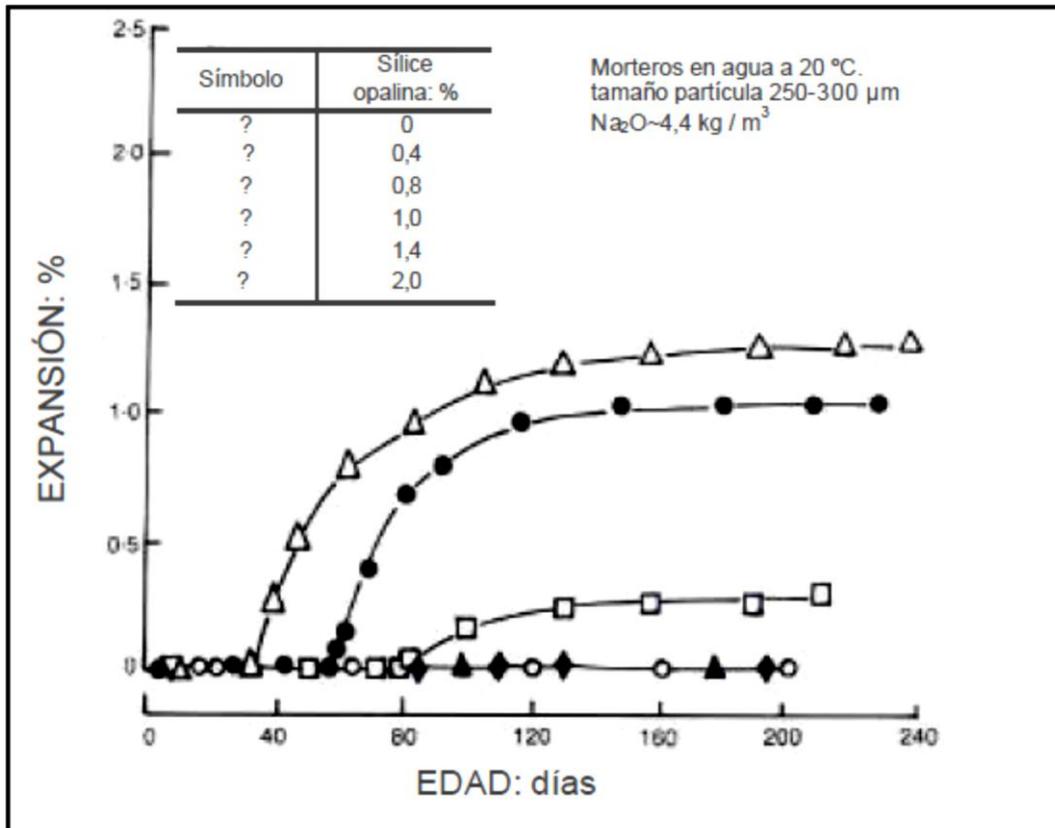


Figura 2.6.- Relación expansión – tiempo.

El efecto pésimo se esquematiza en la *Figura 2.7* para relaciones agua/cemento y árido/cemento de 0,4 y 2,75 respectivamente y un contenido de álcali de 6 kg / m³, y su desarrollo se explica a continuación.

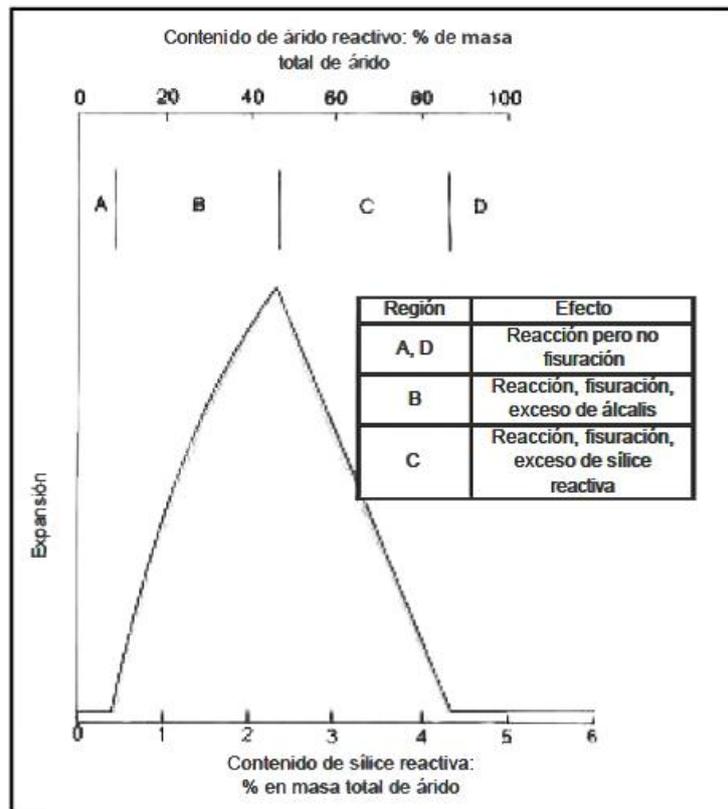


Figura 2.7.- Efecto Pésimo.

- Región A:** El contenido de sílice reactiva es bajo y crecimiento del gel después del hormigón se ha endurecido no es de la suficiente intensidad como para inducir fisuras. El crecimiento del gel ocurre sin ningún efecto adverso en el hormigón.
- Región B:** La reacción continúa después de que el hormigón ha endurecido, y la intensidad de la reacción es suficiente para inducir fisuración. La expansión cesa cuando toda la sílice reactiva se ha reducido o cuando la reacción cae a un nivel lo suficientemente bajo. En esta región hay un exceso de álcalis.
- Región C:** La reacción continúa después de que el hormigón se ha endurecido, se produce fisuración y la expansión cesa cuando los álcalis del agua intersticial son reducidos a un nivel umbral o se han reducido. En esta región hay un exceso de sílice reactiva.
- Región D:** El contenido de sílice reactiva es tan alto y la reacción tan rápida que cuando el hormigón se ha endurecido, la velocidad de crecimiento del gel es demasiado lenta para inducir el agrietamiento. Pueden formarse grandes cantidades de gel sin ningún efecto adverso en el hormigón.

Granulometría

La reacción álcali-sílice puede producirse al utilizar arena o bien grava procedente de un árido reactivo. Hay muchos casos en que la expansión y fisuración del hormigón se produce en presencia de áridos reactivos con un tamaño comprendido en el rango de 1 a 5 mm (es decir, las partículas más gruesas de árido fino), aunque en algunos casos la reacción ha ocurrido en el árido grueso, (Mehta, 1986). Esto se debe a que la cantidad de sílice que reacciona depende de la superficie específica del árido de modo que cuanto mayor sea la relación superficie / volumen, más cantidad estará disponible.

En el caso de la fracción arena, experimentalmente se ha comprobado que la expansión del hormigón es mayor cuánto menor el tamaño de la partícula, hasta llegar al tamaño de 75 μm . Por debajo de este tamaño, la reacción se produce de una manera muy dispersa, sin producir expansiones de importancia y no dando lugar a concentración de tensiones, por lo que la fisuración es menor, (Mehta, 1986).

Por otro lado, en cuanto a la gradación de los áridos, cuando un árido fino reactivo se combina con un árido grueso inocuo, la porosidad del árido grueso afecta a la reactividad global, pues cuánto mayor es su porosidad, menor es el daño que produce, (Alaejos y Bermúdez, 2003). Esto es debido a que los poros actúan como cámara de expansión, de modo que los productos de la reacción, al aumentar de volumen, ocupan en primer lugar estos poros sin provocar tensiones adicionales.

Cuando se trata de árido grueso reactivo, la expansión es menor a una edad temprana, pero irá aumentando continuamente a lo largo del tiempo debido a que la superficie específica es menor que en un árido fino.

En la *Figura 2.8*, (Hobbs, 1988), se muestra la relación expansión - edad en hormigones en que las partículas de árido reactivo varían entre 150-300 μm hasta aproximadamente 13 mm. Estos hormigones tenían un contenido de álcalis de 5 kg/m^3 y fueron ensayados con la relación álcali/sílice más crítica, sus relaciones agua/cemento y árido/cemento de 0,41 y 3 respectivamente.

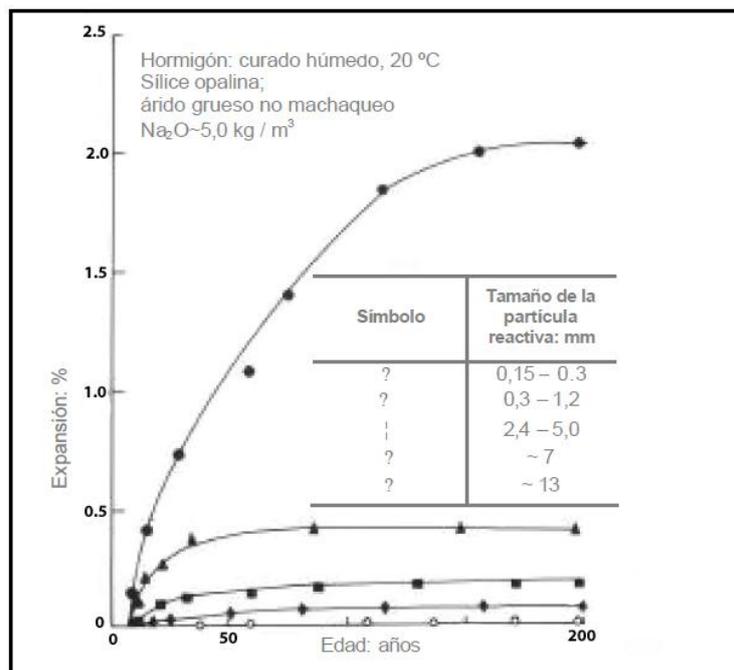


Figura 2.8.- Relación expansión – edad.

Propiedades del cemento, álcalis

Los álcalis sodio y potasio en el cemento tienen su origen en las materias primas usadas para la manufactura del cemento Pórtland, arcillas, piedras calizas, tizas, y esquistos y si el carbón se usa como combustible, también pueden venir de las cenizas de éste. Los compuestos alcalinos en el clínker son sulfatos alcalinos, álcali-aluminatos, aluminoferritas y álcali-silicatos.

El contenido de ácido soluble de un cemento Pórtland se calcula convencionalmente como equivalente en óxido de sodio usando la fórmula siguiente:

$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot (\text{K}_2\text{O})$$

En la *Figura 2.9*, (Mehta, 1986), se puede apreciar que para las rocas estudiadas las expansiones son mucho mayores para el caso de cementos con alto contenido en álcalis, es decir, un contenido mayor al 0,6 %.

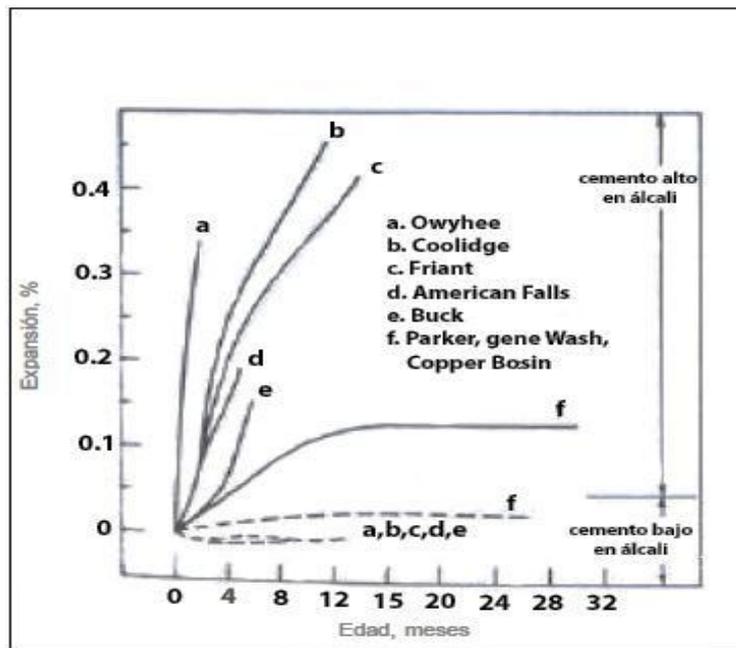


Figura 2.9.- Relación entre expansión y el tiempo con respecto al contenido de álcali del cemento.

Variando el contenido de álcali de un cemento en un hormigón, cambia la concentración de ión hidroxilo, el contenido de álcali disponible y por tanto la relación sílice/álcali. El efecto que los cambios en el contenido de álcalis del cemento puede tener en la expansión, se muestra en la *Figura 2.10*, (Hobbs, 1988), para morteros almacenados continuamente en agua.

El contenido de cemento de los morteros utilizados en estos ensayos es de 670 kg/m^3 . Esta figura muestra que la curva pésima se ensancha mientras que el contenido en álcali del cemento aumenta y que la máxima expansión ocurre para una relación sílice/álcali común de 4,5, las relaciones agua/cemento, y árido/cemento eran de 0,41 y 2 respectivamente, a una temperatura de 20°C . Por otro lado, también se puede observar el efecto pésimo, del que antes se ha mencionado.

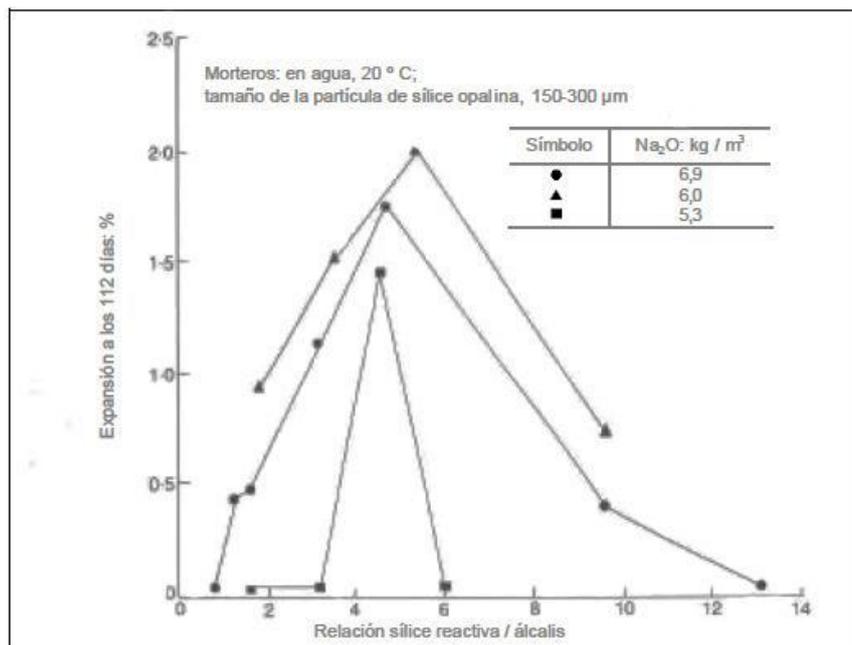


Figura 2.10.- Efecto de los cambios en el contenido de álcalis del cemento con relación a la expansión.

Humedad ambiental

Para que se produzca la reacción álcali - sílice se necesita un cierto contenido de agua. Se considera que no se producirá daño, o que su evolución cesará, si la humedad ambiental es inferior al 80 %, suponiendo el aire como la única fuente de humedad, (Segarra, 2005).

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.

Hay que tener en cuenta, que estructuras como las presas, están en contacto permanente con agua. Éstas tienen, por un lado, contacto permanente con la misma en el paramento aguas arriba y por otro, en su interior, dado que el hormigón tiene un cierto grado de permeabilidad, también habrá cierto grado de humedad.

Temperatura

En general, la velocidad de reacción y la formación de gel aumentan con la temperatura. Pero hay que tener en cuenta que al mismo tiempo, el gel a altas temperaturas es menos viscoso y se introduce mejor por las fisuras y huecos del hormigón, pudiendo disiparse en parte la expansión, (Segarra, 2005).

2.3.2.- Ataque sulfático

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

El ataque sulfático del hormigón es un proceso complejo y, a pesar de que se ha investigado durante décadas, aún no existe pleno consenso sobre los mecanismos mediante los cuales se activa y desarrolla la degradación del hormigón por la acción de los sulfatos. Lo que sí se reconoce con cierta fiabilidad, es que este tipo de compuestos reaccionan fundamentalmente con los componentes del cemento, dando lugar a una serie de nuevas sustancias cuyo volumen es, en la mayoría de los casos, mayor que los productos de reacción. Este incremento de volumen provoca un hinchamiento diferencial en el seno del hormigón cuyas tensiones internas asociadas pueden superar la resistencia a tracción del material, causando la fisuración del mismo, (Segarra, 2005).

Los ataques sulfáticos se clasifican en internos y externos, dependiendo del origen donde provienen los sulfatos. Las fuentes de los sulfatos pueden ser externas (en los suelos, aguas marinas, aguas subterráneas y aguas de embalse) o internas (contenido en sulfatos del cemento, agua de amasado o áridos). En nuestro caso de estudio, solo abarcaremos la reacción sulfática interna, por ser la reacción expansiva que se presenta en la presa que estamos evaluando.

2.3.2.1.- Reacción sulfática interna (RSI)

La reacción sulfática interna (RSI) es comúnmente caracterizada como una reacción causada por el sulfato que tiene como origen el hormigón, sea por la presencia de áridos con sulfuros de hierro, áridos reciclados de residuos de la construcción contaminados con sulfatos, cemento con alto contenido de sulfatos o igual por la formación de etringita tardía, donde después de muchos meses o años, y en presencia de humedad, los cristales de etringita se reforman en el hormigón endurecido, causando la expansión y el agrietamiento, (Oliveira, 2011).

En la mayoría de los casos, la inclusión de cantidades excesivas de sulfato en el hormigón procede de áridos contaminados con sulfuros de hierro como la pirita (FeS_2), pirrotina (Fe_{1-x}S), marcasita (FeS_2) o calcopirita (CuFeS_2), y cuando estos sulfuros de hierro se encuentran en un medio acuoso con el oxígeno disuelto, ellos se oxidan para producir sulfatos. Estos sulfatos, a su vez pueden reaccionar con los productos de hidratación del cemento Portland, formando yeso, etringita secundaria y en algunos casos taumasita, (Oliveira, 2011).

En la literatura existen diversas referencias sobre la influencia de la degradación de los sulfuros de hierro presente en los áridos en la durabilidad del hormigón (Aguado et al., 1998; Ayora et al., 1998; Tagnit-Hamou et al., 2005; Araujo, 2008; Schmidt et al., 2009; Oliveira et al., 2011), la gran mayoría de los autores se refieren a la etringita como el único producto expansivo, sin embargo, bajo ciertas condiciones se puede formar taumasita. Para formar la taumasita deben haber pequeños cristales de etringita para que desde ellos, los cristales de taumasita puedan crecer (Taylor, 1997; Barnett et al., 2003). La formación de taumasita es perjudicial para la durabilidad del hormigón porque además de generar expansión, su reacción de formación consume el silicato de calcio hidratado (Sahu et al., 2002; Metha y Monteiro, 2006).

La etringita y la taumasita tienen una apariencia muy similar, presentan formas aciculares cuando son observadas por microscopía electrónica de barrido (MEB). En las *Figuras 2.11a y 2.11b*, se muestran imágenes de MEB de la etringita y la taumasita respectivamente. En la imagen, la etringita llena los poros capilares del hormigón, mientras que la taumasita, muestra un crecimiento acicular abundante.

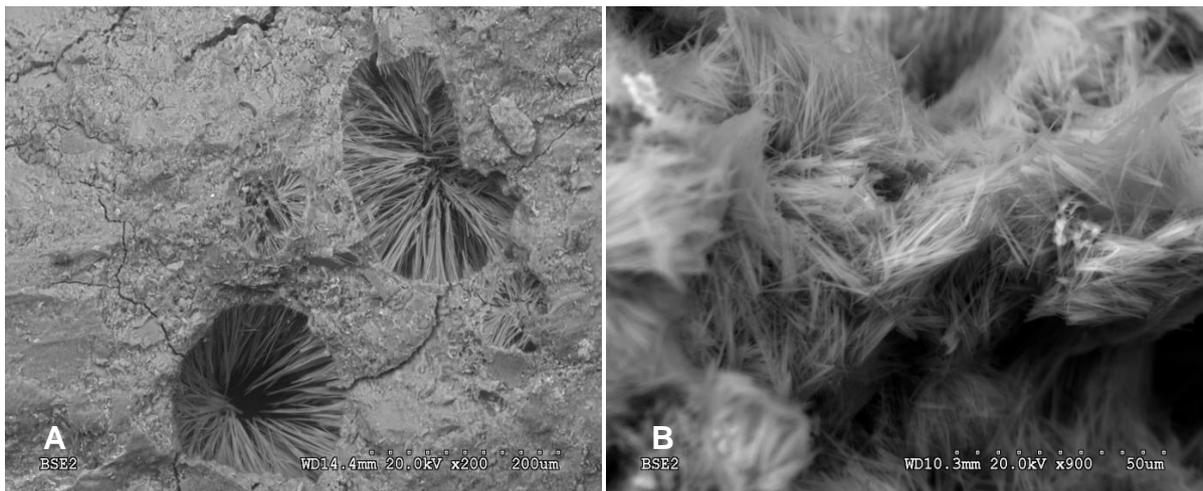


Figura 2.11a, b.- Imágenes de MEB (a. etringita y b. taumasita).

Las normas que regulan la presencia de sulfuros de hierro en los áridos para hormigones no hacen distinción entre el tipo de sulfuro de hierro (pirita o pirrotina) y tampoco se refiere a la importancia de la roca encajante, (EHE-08, 2008; ASTM C294-05, 2005).

Sulfuro de hierro

El sulfuro de hierro o sulfuro ferroso existe en varias formas diferentes, que son determinadas según su estequiometría y propiedades, como: la pirita, la pirrotina, marcasita, calcopirita, arsenopirita, y otros. Dentro ellos los minerales más comunes son la pirita y la pirrotina. Las principales características de estos dos minerales están detalladas a continuación:

- Pirita: es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS_2 . Tiene un 53,4% de azufre (S) y un 46,4% de hierro (Fe). Se presenta con una estructura isométrica, siendo la forma cristalina como cubo y dodecaedro pentagonal. Las caras del cubo suelen presentarse estriadas, de modo que las estrías de una cara son perpendiculares a las de las otras dos. Color amarillo de bronce a amarillo de latón pálido. Rayado verdosa o negropardusca. Lustre metálico muy brillante; opaco. Fractura concoide, desigual, frágil, (Oliveira, 2011).
- Pirrotina: es un mineral con un contenido variable de hierro (Fe_{1-x}S), en el que el valor de X puede variar entre 0,125 y 0. Se encuentra junto a la pentlandita en rocas ígneas básicas, en filones y en rocas metamórficas. También se encuentra a menudo junto a la pirita, marcasita y magnetita. La pirrotina tiene varios politipos de simetría cristalina hexagonal o monoclinica; a veces, se presentan varios politipos en el mismo espécimen, (Oliveira, 2011).

En un estudio sobre la oxidación de los sulfuros de hierro Chinchón-Payá et al. (2010), evaluaron el desarrollo de la oxidación de la pirita y de la pirrotina en el medio acuoso para diferenciar su comportamiento de degradación. De acuerdo con los autores, la pirrotina proporciona 20% más de sulfatos en el agua de disolución que la pirita. Si estas aguas entran en contacto con el hormigón podría conducir un ataque agresivo.

Agentes Oxidantes

Las reacciones de oxidación se ven especialmente favorecidas en medio húmedo (presencia continua de agua), así que, el contacto constante con el agua del embalse en las grandes superficies expuestas hacen de las presas de hormigón estructuras susceptibles a la RSI, (Aguado, et al., 1998).

La temperatura y el área específica son otros factores que aceleran el proceso de oxidación. De una manera general, el aumento de temperatura acelera los procesos reactivos, Steger (1982) apreció un aumento de la velocidad de oxidación de la pirrotina con el incremento de la temperatura ambiente. Por otro lado

los estudios experimentales de Nicholson (1994) demuestran que el índice de oxidación de la pirita es proporcional a la superficie de reacción disponible.

Otro factor determinante en la cinética de oxidación de los sulfuros de hierro es el coeficiente de difusión del oxígeno, su valor depende de la temperatura, de la viscosidad del medio, siendo que cuanto mayor es la viscosidad del medio menor es el coeficiente de difusión, y menor por tanto la velocidad en que se difunde. El coeficiente de difusión del oxígeno en el agua o soluciones acuosas y en condiciones normales, es de 10^{-5} cm²/s, aproximadamente. Con hormigones de porosidades comprendidas entre el 10 y el 20 %, serían de esperar coeficientes de difusión de oxígeno de $0,1 - 0,2 \cdot 10^{-5}$ cm²/s, pues el oxígeno difundiría exclusivamente a través de la fase acuosa contenida en los poros (González y Miranda, 2004).

Si bien la variación apreciada puede deberse a diferencias en los materiales empleados, en la preparación de las muestras y en las técnicas de medición (Page & Lambert, 1987), la humedad o el grado de saturación de los poros es el factor que más influye en el coeficiente de difusión (Francinete Jr & Figueiredo, 1999). Esto queda evidente en la *Figura 2.12* que muestra la variación del coeficiente de difusión de oxígeno en función de la humedad de hormigones producidos con dos relaciones A/C.

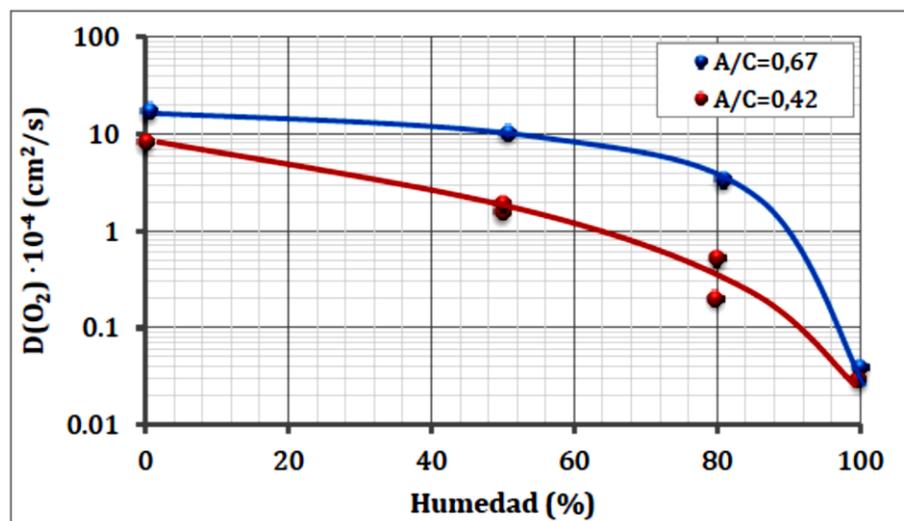


Figura 2.12.- Influencia de la variación de la humedad en el coeficiente de difusión de O₂, (Tuutti, 1982).

Tal y como se observa en las curvas, el aumento del contenido de humedad del hormigón implica en una reducción significativa del coeficiente de difusión de oxígeno, lo que se acentúa conforme la humedad se acerca a 80%. Ese

comportamiento se debe a que el coeficiente de difusión del oxígeno en el agua es más bajo que en el aire. Por lo tanto, el incremento en la humedad aumenta la incidencia de poros rellenos con agua, los cuales actúan como barreras a la difusión del oxígeno en el hormigón (Francinete Jr & Figueiredo, 1999) y reducen el coeficiente de difusión medido.

2.4.- Sintomatología de las reacciones expansivas en hormigones de presas.

En este apartado se destacan los efectos estructurales de presas de hormigón afectadas por la RSI y RAS, conociendo los efectos de la reacción en la estructura es posible realizar un diagnóstico más correcto y fiable. Los dos principales problemas que se generan en las presas por este tipo de reacciones son la fisuración y los movimientos remanentes.

La fisuración es el efecto visual más común de las reacciones expansivas en las presas. Las fisuras en general se presentan de dos maneras básicas: fisuración mapeada u orientada.

- Fisuración mapeada: estas fisuras son consecuencia de una expansión diferenciada, que es considerada como la fisuración típica debido a expansiones internas. Este tipo de fisuración ha sido detectada en diferentes presas de hormigón con expansiones, (Buil et al., 2008; Alaejos y Bermúdez, 2008; Araújo, 2008).
- Fisuración orientada: estas fisuras pueden ser paralelas a la dirección del esfuerzo (compresión) o normales a la dirección del esfuerzo (tracción). Las fisuras con una tendencia a seguir líneas a 45°, generalmente son debidas a esfuerzos de torsión y denotan armaduras de refuerzo insuficientes para contrarrestarlos. Este tipo de fisuración ha sido detectada en diferentes presas, (Van Den Berg y Seddon, 1991; Matos et al., 1995; Río et al., 2008).

En la *Figura 2.13a* se observa la fisuración mapeada en una estructura auxiliar de la presa de Graus. La *Figura 2.13b*, muestra una fisuración orientada en la viga superior del acceso a la galería de la presa.

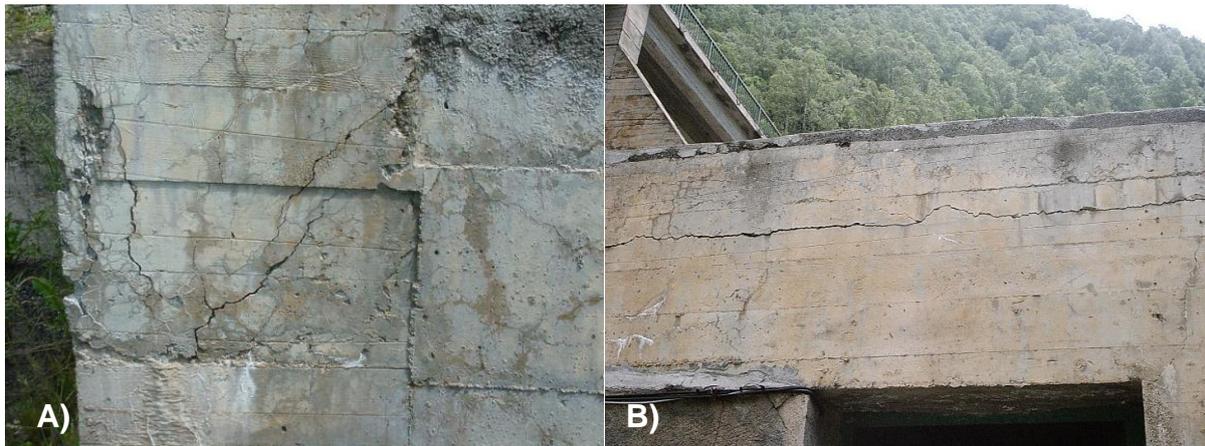


Figura 2.13a, b.- Presa de Graus: a) estructura auxiliar b) acceso a la galería de la presa.

Las fisuras presentadas anteriormente son debido a las tensiones internas generadas por los productos expansivos de las reacciones. En el caso de la *Figura 2.13b*, la orientación de la fisura se debe a la existencia de la armadura, así que, la fisura termina alineándose a la misma.

Otra patología que presenta el fenómeno expansivo en presas hormigón son los movimientos no recuperables registrados por los sistemas de auscultación. Estos son otra consecuencia directa, y generan desplazamientos relativos entre los bloques de hormigón, los cuales se producen para poder liberar energía y así aliviar tensiones generadas por el incremento de volumen producido por la expansión, (Oliveira, 2011).

La *Figura 2.14* muestra la representación gráfica de los movimientos de nivelación registrados por los sistemas de auscultación de la presa de Graus, que es una presa de hormigón de planta recta, además, la figura muestra los ajustes realizados por Araujo (2008), para un punto de inflexión igual a 400 meses.

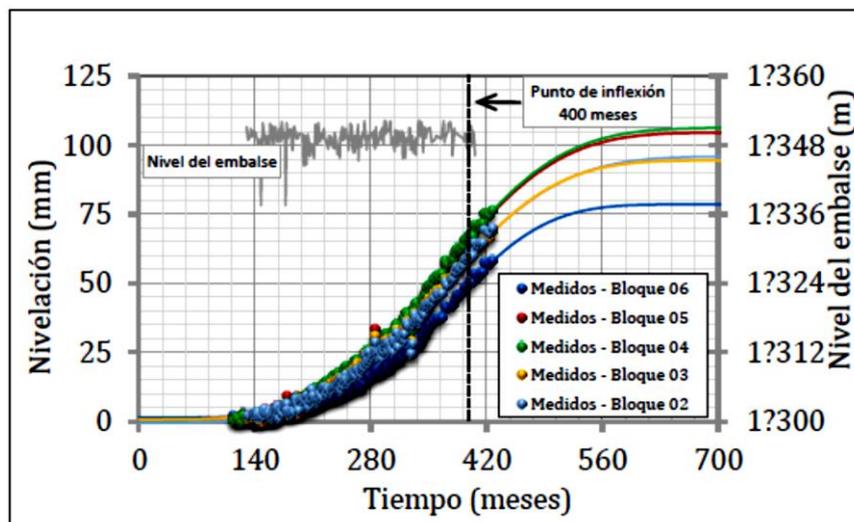


Figura 2.14.- Movimientos de nivelación medidos en la presa de Graus, (Araujo, 2008).

Los movimientos representan desplazamientos remanentes importantes y cuantitativamente muy superiores a la componente cíclica resultante de las variaciones estacionales y de régimen hidráulico. Los desplazamientos hacia aguas arriba para la presa de Graus están actualmente alrededor de 80 mm. La *Figura 2.15* muestra las representaciones gráficas de los movimientos de alineación registrados por los sistemas de auscultación para los bloques 2, 3, 4, 5 y 6 de la presa de Graus.

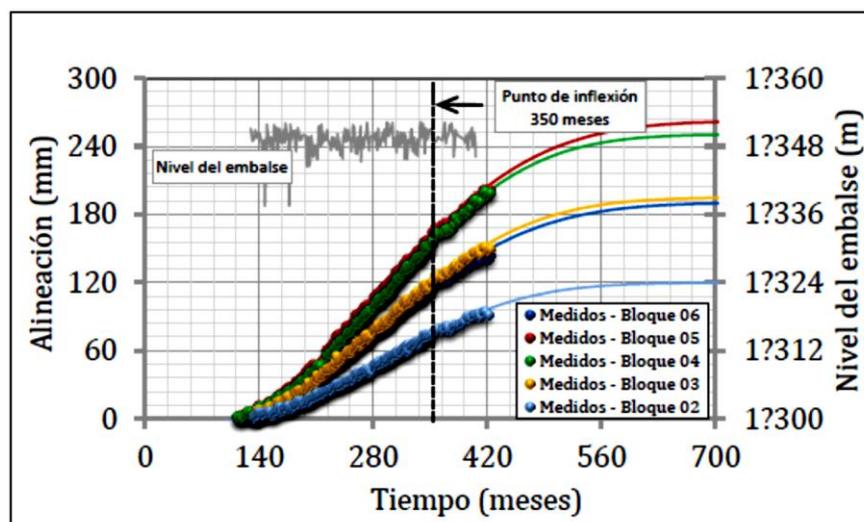


Figura 2.15.- Movimientos de alineación medidos en la presa de Graus, (Araujo, 2008).

Según Araujo (2008), las nivelaciones presentan unos tiempos de inflexión algo más altos que los movimientos de alineación. La causa puede encontrarse en la diferencia de velocidad del desarrollo de las reacciones en los paramentos de las presas debido a la disponibilidad de los agentes oxidantes, ya que los estudios de Casanova et al. (1996 y 1997) han confirmado que la estabilización del proceso expansivo en las zonas sumergidas es más lento que en las zonas en condiciones atmosféricas.

En el nivel macro-estructural eso implica que los sulfuros de hierro cerca del paramento aguas arriba llevarán un tiempo sustancialmente mayor para oxidar que los que se encuentran cerca de los paramentos aguas abajo o en zonas no sumergidas del paramento aguas arriba, (Oliveira, 2011).

La concentración de oxígeno más alta en el paramento aguas abajo provoca un giro de la coronación hacia aguas arriba. Con el paso del tiempo, la cinética de las deformaciones provocadas por las expansiones en zonas más cercanas al paramento aguas abajo llegan a su máximo, mientras que en los paramentos aguas arriba las expansiones están en fase de pleno desarrollo (baja concentración de

oxígeno). En este momento, los movimientos de alineación alcanzan su gradiente máximo, debido al valor más alto que alcanzan las diferencias entre las deformaciones de los dos paramentos, (Oliveira, 2011).

Por último, las deformaciones en paramentos aguas abajo, avanzan hacia el interior de la presa. Por otro lado, en el paramento aguas arriba, la deformación sigue creciendo y la diferencia de deformaciones entre ambos paramentos disminuye, provocando una desaceleración de los desplazamientos hacia aguas arriba, y como consecuencia crea diferencias entre los puntos de inflexión de los movimientos medidos en alineación y nivelación de la presa, (Oliveira, 2011).

2.5.- Campañas experimentales en presas

2.5.1.- Instrumentaciones 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.

Aun 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, (Pardo, 2009).

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, (Pardo, 2009).

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 y se apoya más bien en

experiencias previas de otras presas. Existen otras tecnologías de auscultación distribuida, siendo el Laser Scanning 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 un 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.

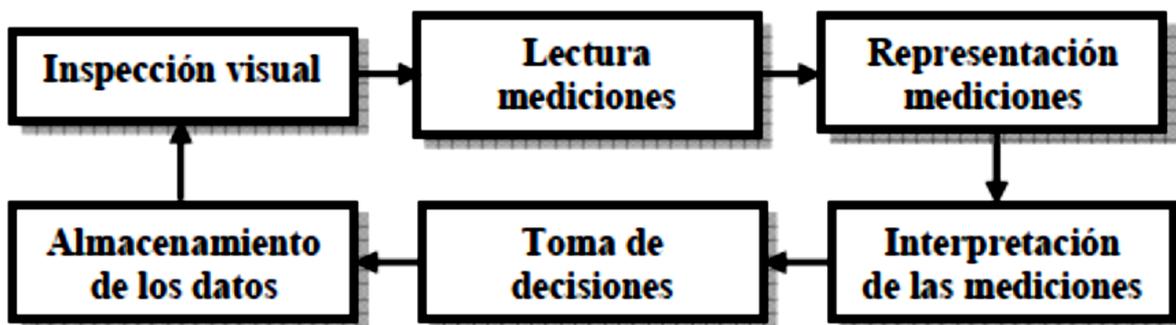


Figura 2.16.- Organigrama del ciclo de análisis e interpretación del comportamiento de una estructura general, (Pardo, 2009).

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 2.2*, (Lombardi, 2006).

Clase	Tipo de datos disponibles
0	Ningún dato disponible
1	Sólo inspección visual
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 2.2.- 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 lo remarca, pero, que estos sistemas no siempre son utilizados de manera óptima.

Los dispositivos de instrumentación sirven para medir y llevar control de los movimientos de la presa y los elementos de su estructura, tales como:

- 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.

2.5.2.- Extracción de testigos de hormigón en presas

En la mayoría de los casos, luego que se detectan los síntomas en la estructura de la presa, son necesarios estudios y ensayos del hormigón de la presa para poder diagnosticar con exactitud el fenómeno que se está produciendo, y así poder predecir el comportamiento de la estructura. Es por esto, que en el proceso de las campañas experimentales de las presas, la toma de muestras de testigos de hormigón es de suma importancia.

Los testigos de hormigón son muestras cilíndricas extraídas de la propia estructura ya cuando este ha endurecido, pudiendo ser sólo algunos meses luego de la puesta en obra, o inclusive decenas de años. La forma de extracción de estos testigos se hace mediante perforaciones de rotación con herramientas especializadas, y por lo general, en el caso de las presas, se utilizan brocas con un diámetro de pila de 55, 75, 130 mm.

Las muestras extraídas poseen un diámetro específico, sin embargo, la longitud de la perforación varía con relación a la profundidad que se desea llegar en el elemento. En nuestro caso de estudio, la profundidad de perforación máxima de los testigos fue de 5,05 m. Para llegar a grandes profundidades, el testigo se extrae segmentado porque la broca de perforación tiene una capacidad fija, y lo que se va agregando son las barras extensoras, a medida que se extraen segmentos del testigo. En la Figura 2.17, se observa el proceso de perforación para la extracción de testigos en presas. En la imagen se puede observar el tipo de herramienta especializada, que en este caso es un taladro montado sobre una base con riel.

Las muestras extraídas son utilizadas en distintos ensayos para determinar el tipo de fenómeno expansivo que está ocurriendo. Ensayos como: Microscopía de barrido electrónico (MBE), Difracción por rayos X (DRX), tinciones selectivas,

ensayos de permeabilidad y porosidad, mapa de fisuraciones por ultrasonido, entre otros.



Figura 2.17.- Extracción de testigo dentro de una galería de presa (ATI, empresa española).

2.6.- Antecedentes presa de Graus

La presa de Graus fue construida entre los años 1968 (el día 30 de Enero de ese año se inicia la perforación del túnel de desvío) y 1971 (el primer llenado del embalse se realizó entre los días 23 y 28 de Noviembre de dicho año), (Aguado et al., 1993). Dicha presa responde al esquema de gravedad de hormigón de planta recta, con aliviadero de labio fijo por coronación. La altura de la misma es de 28,90 m mientras que la longitud de coronación es de 102,44 m. La estructura está ubicada en los Pirineos, España, dentro de una zona donde predominan las pizarras metamórficas entrecortadas por vetas de sulfuros.

La presa tiene 7 bases en coronación, ubicadas en los distintos bloques tal como se aprecia en el alzado de la *Figura 2.18*. También, en la *Figura 2.19* se presenta un perfil transversal del bloque 5 de la presa. Esta presa dispone de un sistema de auscultación que permite medir movimientos de alineaciones y nivelaciones en cada una de las bases existentes en coronación y en galería de visita en el caso de la presa de Graus. Estas bases fueron instaladas 10 años después de la construcción de la presa.

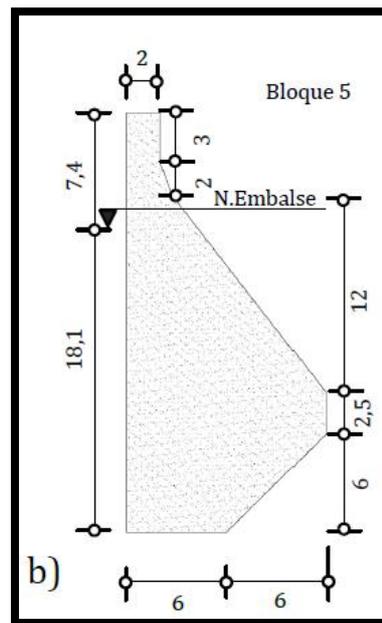
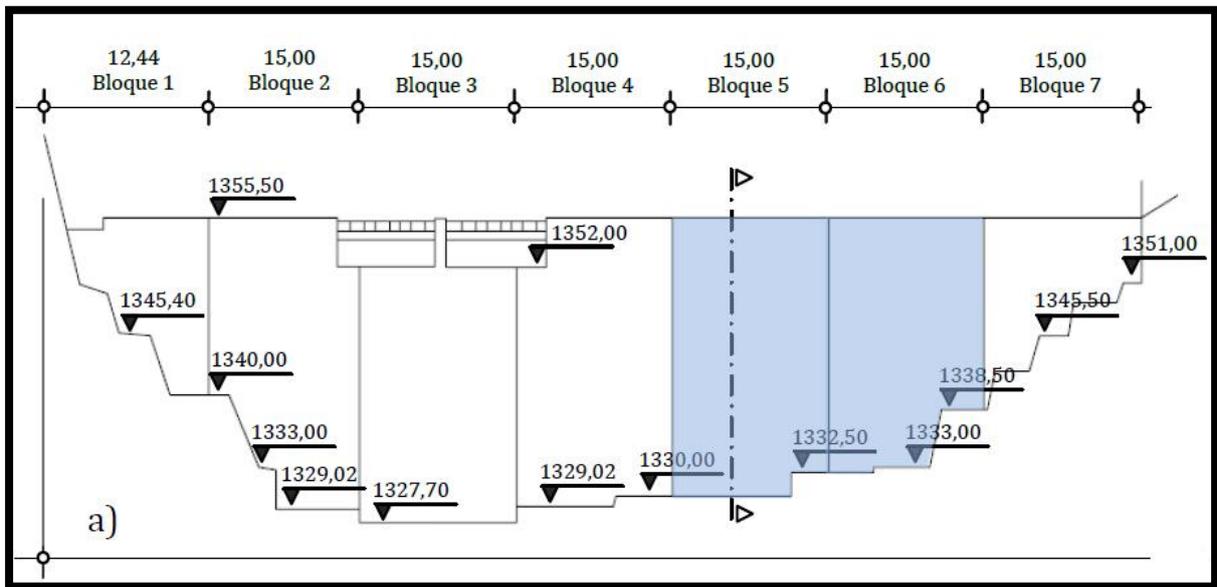


Figura 2.19.- Sección del Bloque 5 de la presa de Graus, (Oliveira, 2011).

Los registros obtenidos en las distintas bases de coronación de la presa muestran que existen unos movimientos de las alineaciones hacia aguas arriba y una elevación de las nivelaciones. A manera de ejemplo, en las anteriores Figuras 2.14 y 2.15, se presentan los movimientos de las nivelaciones y alineaciones en las bases de la presa. En ella puede verse la existencia de unas deformaciones remanentes. Las acciones de tipo variable y/o cíclico (temperatura y nivel del

embalse) conducen a valores de los movimientos de un orden de magnitud inferior al de las citadas deformaciones remanentes.

Aparte de este hecho, en esta presa se presenta otro síntoma, en especial, una fisuración enramada en paramento aguas abajo y cambios de coloración. En la Figura 2.20, se muestran los síntomas en un tajamar de coronación existente en la presa de Graus.



Figura 2.20.- Fisuración en ramada en paramentos aguas abajo de la presa de Graus, (Aguado et al., 1993).

Según Aguado et al. (1993), el comportamiento de la presa fue detectado por los técnicos de FECSA, los cuales hicieron distintas actuaciones encaminadas a realizar un correcto diagnóstico. Una vez descartadas diversas causas de dicho comportamiento se planteó la posibilidad de realizar un dictamen sobre el hormigón por parte de técnicos de la U.P.C. Los trabajos realizados en esa etapa, enmarcados en el convenio U.P.C. C-478, se presentó con el informe final titulado: "Documento no7. Dictamen sobre las posibles causas que influyen en el anómalo comportamiento de la presa de Graus".

Como conclusión de 2 estudios previos de la presa, (Aguado et al., 1993; Oliveira, 2011) se obtuvo que la causa principal del comportamiento de la presa, era la expansión del hormigón provocada por las reacciones de los componentes inestables de los áridos (sulfuro de hierro en forma de pirrotina) y que la misma alcanzaba a todos los bloques, a las distintas geometrías de la presa. Las recomendaciones propuestas fueron de vigilar la evolución del comportamiento y una profundización en el conocimiento del problema a partir de actuaciones en la

presa, en laboratorio y con métodos numéricos en ordenador. Sin embargo, dichos estudios no explican el problema en su totalidad, ya que los modelos numéricos no reflejan las fisuraciones y movimientos que sí están ocurriendo en la presa de Graus. Esto sugiere, que simultáneamente, está ocurriendo un segundo proceso expansivo que no se ha tomado en cuenta hasta el momento.

2.7.- Discusión

Como se había mencionado anteriormente, la ausencia de metodologías detalladas para el diagnóstico preciso de las causas de procesos expansivos en presas de hormigón, puede llevar a una previsión poco realista de su evolución en el tiempo., conduciendo a tratamientos y reparaciones poco efectivas, menos seguridad para la sociedad y mayores costes de mantenimiento en la vida útil de la estructura.

El desarrollo de una propuesta metodológica para la caracterización de testigos de presas con problemas expansivos, se realizará en base al caso de estudio de la presa de Graus. Esta presa se eligió, porque los registros obtenidos en las distintas bases de coronación de la presa, muestran que existen unos movimientos remanentes de las alineaciones hacia aguas arriba y una elevación de las nivelaciones a lo largo de los años.

Estos movimientos remanente, se han estudiado previamente en los estudios: “Estudio del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán” en 1993 y “Reacción sulfática interna en presas de hormigón: cinética del comportamiento” en 2011. Como se había mencionado anteriormente, ambos estudios tratan la reacción sulfática interna de la presa.

Las reacciones expansivas son mecanismos los cuales transforman algunos de los productos presentes en la pasta del hormigón o en sus áridos, cambiando las características volumétricas que inicialmente poseían.

Según el estudio de Aguado et al. (1993), los áridos utilizados en la presa de Graus poseen sulfatos reactivos, como es el caso de la pirrotina. De acuerdo a la definición de las reacciones sulfáticas, ésta, al oxidarse en presencia de agua, es responsable de formación de sub-productos expansivos.

Sin embargo, según la tesis doctoral de Andre Campos de Mora, que se realiza actualmente en la Universitat Politècnica de Catalunya, y aún se encuentra en proceso de redacción, los intentos de modelización numérica sólo contemplando la reacción sulfática interna, no predicen los valores de los movimientos que están registrados por la instrumentación de la presa. Los valores numéricos reales, son

mayores que los calculados por la modelización numérica. Esto sugiere que la presa está siendo afectada por un segundo mecanismo de expansión diferido en el tiempo.

El desarrollo de un método que sirva como una propuesta metodológica para evaluar y diagnosticar los mecanismos expansivos existentes en los hormigones de presas, está más que justificado, en base al caso de estudio de la presa de Graus. En ella se podrán implementar la metodología de caracterización de testigos con problemas expansivos, y también el análisis de todos los datos necesarios para diagnosticar las reacciones expansivas que existen como patologías en esta presa.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1.- Introducción

En este capítulo trataremos el ámbito de la metodología empleada durante la campaña experimental que se ha hecho para este caso de estudio sobre la presa de Graus. Primero, definiremos lo que es la metodología de caracterización de testigos, para luego pasar a una segunda fase de una metodología de análisis de los datos obtenidos.



3.2.- Objetivos

Los objetivos que se han de alcanzar en este capítulo son principalmente de definir paso por paso, las metodologías usadas desde la extracción de los testigos durante la campaña experimental hasta inclusive el análisis de los datos obtenidos luego de realizar todo el proceso de ensayos.

La metodología general de caracterización de los testigos abarcará toda la parte práctica y experimental con relación al procesamiento de las muestras extraídas. Por otro lado, la parte de la metodología de análisis, abarcará el estudio de todos los datos obtenidos en la parte práctica de la caracterización de estos testigos.

3.3.- Metodología general de caracterización de los testigos.

La metodología general para la caracterización de los testigos que vamos a seguir se presenta en forma de síntesis en la *Figura 3.1*:

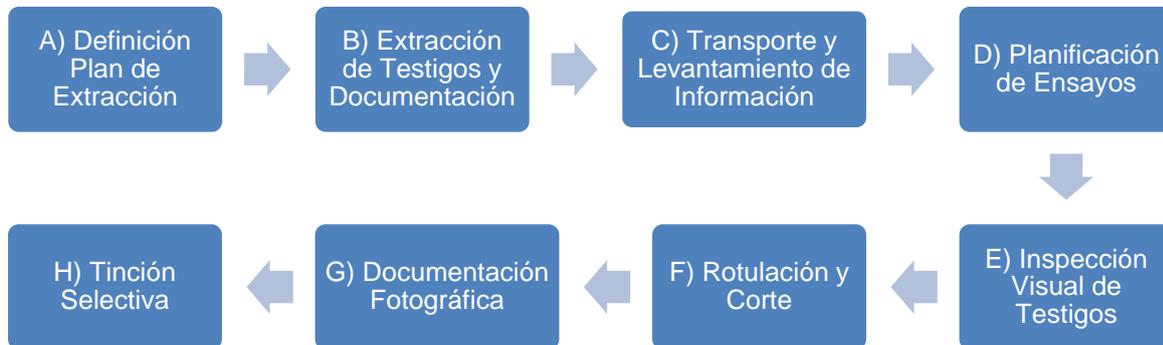


Figura 3.1.- Pasos de la metodología general de caracterización de testigos.

3.3.1.- Definición del plan de extracción de testigos:

Primero se realizó una visita a la obra para hacer una inspección visual de las áreas afectadas de la presa. Luego, en los planos de la presa, se localizaron los bloques de hormigonado más afectados por el efecto de la reacción expansiva.

Lo siguiente fue planificar el número de perforaciones, el diámetro y la longitud de extracción de los testigos. En nuestro caso de estudio, se eligieron 8 lugares de extracción para las perforaciones, 4 en el paramento aguas abajo, y 4 en el área de la galería interior de la presa (2 ascendentes y 2 descendentes). Se utilizó una broca con un diámetro de pila de 8,5 cm, y las longitudes varían entre 1,95m y 5,05 m. En la *Figura 3.2*, se muestra una sección longitudinal de la presa con la ubicación de los testigos localizados en la galería interior de la presa, en los bloques 4 y 5. Por otro lado, en las *Figuras 3.3a* y *3.3b* se muestra respectivamente, una planta y una sección transversal con la localización de las perforaciones en el muro de paramento desde aguas abajo de la presa.

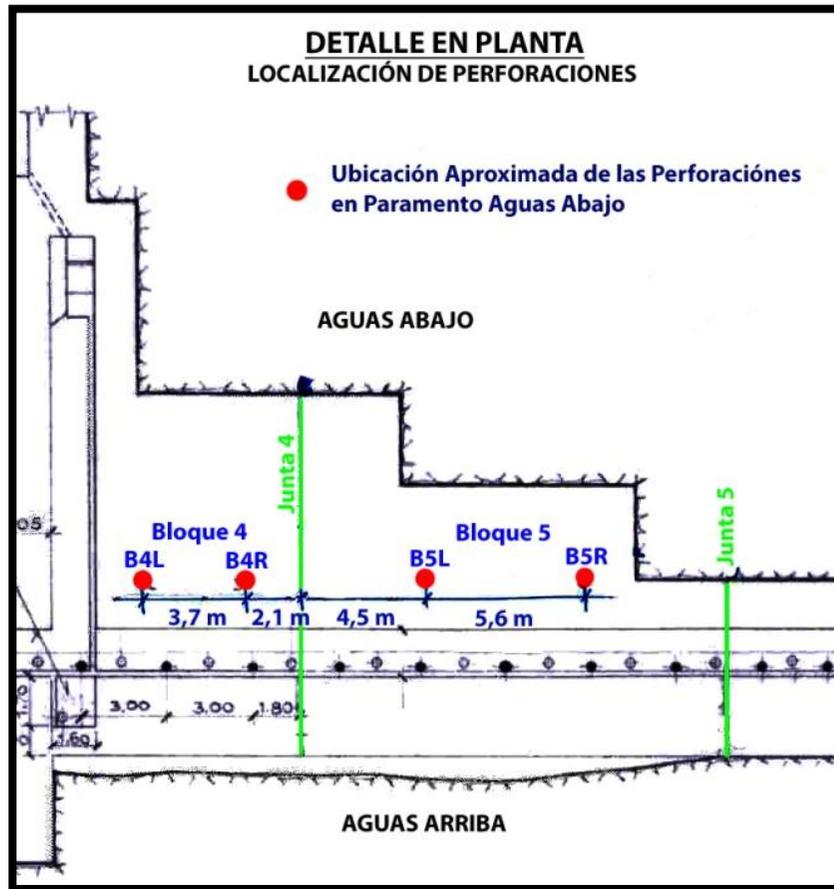


Figura 3.4.- Sección transversal mostrando la ubicación de los testigos en el paramento aguas abajo.

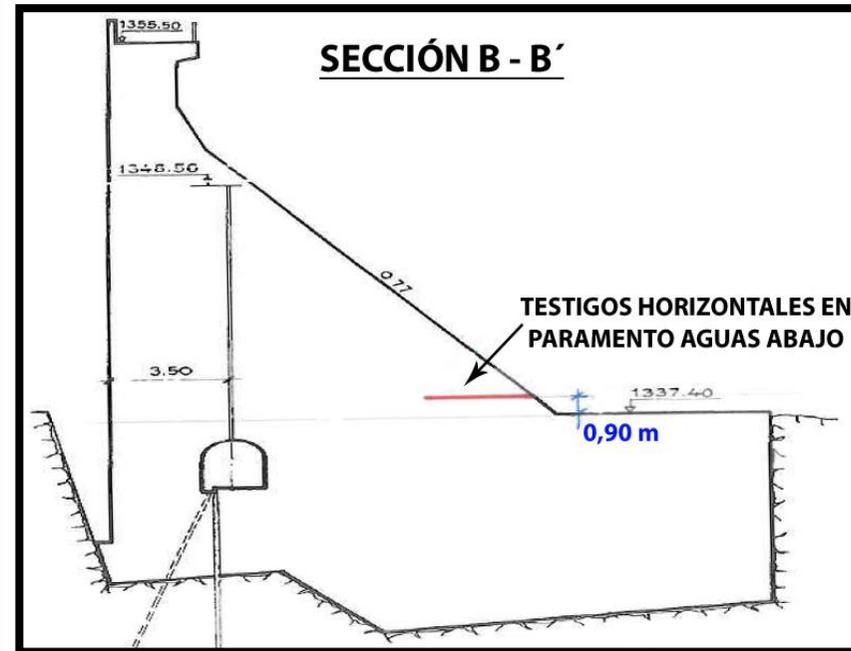


Figura 3.3.- Detalle en planta de la localización de las perforaciones de la presa de Graus.

3.3.2.- Extracción de testigos y documentación:

Se realizó la extracción de los testigos y se procedió a empacarlos, sellándolos con tapa en tubos de PVC. Las cajas contenedoras (tubos de PVC) para empacar los testigos estaban selladas con la mayoría de las muestras sumergidas en agua, y además estaban envueltas en plástico con burbujas de aire para brindarles mayor protección. Cada caja de empaque de los testigos contenía una etiqueta con la siguiente información:

- Nombre de la presa
- Referencia de la localización de extracción.
- Fecha de la extracción
- Sentido u orientación de la perforación
- Profundidad inicial y final de las muestras en cada caja.
- Número de la caja y el número total de cajas.
- Nombre de la compañía que realizó la extracción.

3.3.3.- Transporte y levantamiento de información:

El transporte consistió en movilizar los testigos empacados al laboratorio donde se hizo la caracterización. En este proceso de transporte, algunos de los tubos de empaques sufrieron daños en las etiquetas, y otros, se rompieron, dejando expuestas las muestras que estaban dentro.

Luego, en el laboratorio, se levantó toda la información existente con relación a la extracción de los testigos, en una tabla. Esta tabla incluía el número y las condiciones en que estaban todas las cajas contenedoras de los testigos, así como los datos que aparecen en las etiquetas (Ver *Anejo 1*, para la tabla de información de las etiquetas de los testigos). La información debe incluir todo lo citado en la etiqueta de cada contenedor. Aquí se presenta alguna información adicional que se incluye como parte de nuestro caso de estudio:

Total de Testigos: 8

Testigos extraídos en paramento: 4

2 testigos del bloque número 4 (1 del lado derecho y 1 del lado izquierdo).

2 testigos del bloque número 5 (1 del lado derecho y 1 del lado izquierdo).

Testigos extraídos desde la galería interior: 4

2 testigos del bloque número 4 (1 ascendente y 1 descendente).

2 testigos del bloque número 5 (1 ascendente y 1 descendente).

Diámetro aproximado de los testigos 8,6 cm.

Diámetro de la Broca utilizada en la perforación: 10 cm.

3.3.4.- *Planificación de ensayos:*

En este paso, se planificaron los ensayos que se iban a realizar como parte del proceso de caracterización de las muestras. Los ensayos que se planificaron en nuestro caso de estudio fueron: porosidad, densidad, mapa de fisuras por ultrasonido, permeabilidad del O₂ y tinciones selectivas.

Para poder ejecutar los procedimientos planificados, primero se definieron los patrones de corte y la programación para procesar cada testigo tomando en cuenta la ubicación de extracción en la presa, y las limitaciones de espacio para procesar las muestras cortadas.

- Cortes de 2 cm para las tinciones selectivas.
- Cortes de 5 cm para los ensayos de permeabilidad al O₂ y porosidad.
- Cortes de 9 cm para los ensayos de ultrasonido y porosidad.

En nuestro caso se eligieron dos patrones de corte distintos:

- Patrón de los cortes utilizado:
 - 2 cm – 2 cm – 9 cm (Testigos B5L, B4L, B5D, B4A).
 - 2 cm – 2 cm – 5 cm (Testigos B5R, B4R, B5A, B4D).
- Tinciones utilizadas en los testigos:
 - Primera tinción:
 - Sulfatos: Testigos B5L, B4L, B4D, B4A.
 - PH: Testigos B5R, B4R, B5A, B5D.
 - Segunda tinción:
 - Calcio: Testigos B5L, B4L, B4D, B4A.
 - Potasio: Testigos B5R, B4R, B5A, B5D.

Por último, se prepararon los materiales que se usaron y las áreas de trabajo. Entre los materiales y herramientas usados están:

- Flexómetro: Se usó un flexómetro métrico estándar de 5 metros.

- Rotuladores permanentes: Para el etiquetado y marcado de las piezas de hormigón se usaron rotuladores negros permanentes, marca Staedtler, de punta mediana.
- Mesa de trabajo: Se utilizaron 2 mesas de trabajo de color blanco, resistente y de dimensiones 2,00m x 0,90m.
- Sierra para cortes de probetas de hormigón: Para los cortes de los testigos se usó una cortadora marca Matest, modelo C-350, con un disco de corte con un ancho de 3mm. *Ver figura 3.5.*



Figura 3.5.- Cortadora de probetas de hormigón utilizada para seccionar los testigos.

- Cámara fotográfica digital: Se utilizó una cámara marca Sony, modelo Cyber-Shot de 7,2 megapíxeles.
- Trípode para cámara: Se usó un trípode para tomar las fotografías a una distancia de 35cm en posición vertical sobre las muestras.
- Base de fondo para documentación fotográfica: Se utilizó una base de cartón con un acabado de cartulina negra sin brillo, para causar que las muestras cortadas resalten con el cambio de contraste. Además se colocó una moneda de 5 céntimos de euro en la esquina superior izquierda para tener una referencia dimensional.

- Iluminación para la documentación fotográfica: Se utilizaron dos focos halógenos de 500 watts cada uno, dirigidos a la base del set de fotografiado en un ángulo de 60 grados aproximadamente con relación a la superficie, para evitar reflejos en la muestra.
- Envases para las tinciones: Para las tinciones se usaron envases comerciales de forma cilíndrica y de plástico para pinturas de 4 litros.

3.3.5.- Inspección visual:

En este paso de la metodología utilizada, se sacaron de las cajas los testigos. Luego se procedió a elaborar una descripción de las condiciones físicas en que se encontraba cada testigo en la caja. Lo siguiente fue la numeración secuencial de los segmentos debido a la rotura del testigo por el proceso de extracción y transporte, con un rotulador permanente. Se utilizó la nomenclatura de etiquetado siguiente:

B5L – P12S10

- B5:** Hace referencia al número del bloque de hormigonado perforado de la presa. En este caso al “Bloque de hormigonado 5”.
- L:** Hace referencia a la posición u orientación dentro del bloque. En este caso “L” viene dado por la palabra izquierda en inglés “Left”. En otros casos, “R” es “Right” (Derecha), “A” es “Ascendent” (Ascendente) y “D” es “Descendent” (Descendente).
- P12:** Hace referencia al número de la pieza del testigo sacado de su contenedor, tomando en consideración la dirección de la perforación para la extracción del testigo. En este caso significa “Pieza número 12”.
- S10:** Hace referencia al número de la sección de corte referente a cada pieza, siempre en orden ascendente en dirección de la perforación. En este caso significa “Sección 10”.

En la *Figura 3.6*, se muestra un ejemplo del rotulado de una pieza del testigo.



Figura 3.5.- Se muestra la pieza 11, del testigo del bloque de hormigonado 5, en dirección descendente. Este consta de 13 secciones, con un patrón de corte de 2 cm – 2 cm – 9 cm.

3.3.6.- Rotulación y Corte:

Para poder rotular y cortar las muestras, se realizó el ensamblado de las piezas o segmentos que componen el testigo completo, encima de la mesa de trabajo. En la *Figura 3.6* se presenta un ejemplo del ensamblado del testigo sobre la mesa de trabajo.



Figura 3.6.- Testigo completamente ensamblado sobre la mesa de trabajo. Detrás se muestra el contenedor de donde fue almacenado y transportado.

Luego, se indicó la primera sección a ser cortada en cada pieza y se tomó la medida acumulada con flexómetro de los valores iniciales, finales y del primer corte en cada pieza. En los *Anejos 4, 5, 6*, se presentan la información de todos los testigos con sus medidas de referencia.

Además del ensamblado y las mediciones, se realizó un fotografiado general y detallado del testigo, descripción y análisis preliminar de las características observadas en cada segmento. Algunas de las características observadas fueron: condición física de las muestras, humedad, material suelto, precipitados, suciedad, fisuras en la pasta, fisuras en los áridos, decoloración, tipo de áridos, tamaño de los

áridos. Para más detalles de las muestras de nuestro caso de estudio ver las *Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8.*

Después se procedió a marcar y numerar con rotulador permanente, según la nomenclatura especificada anteriormente, todas las secciones de cada pieza a ser cortada. Cada pieza se rotuló individualmente, tomando criterios para obtener la mayor cantidad de muestras en los cortes como haya sido planificado para los ensayos.

Lo siguiente que se realizó, fue documentar todas las piezas enumeradas y su ubicación con respecto a las medidas tomadas anteriormente. Por último, se procedió al corte con sierra de los testigos y posterior limpieza de las muestras de cualquier residuo dejado.

3.3.7.- Documentación fotográfica:

En este paso, se hizo una documentación fotográfica de todas las caras de corte de las secciones, utilizando la iluminación especificada y la base de fondo especificada con la referencia dimensional. Para este procedimiento, la cámara se colocó en modo macro y automático, con un zoom óptico fijo de 1,5x y en calidad máxima de resolución.

Luego, se seleccionaron las muestras a utilizar en los distintos tipos de ensayos:

- a. Permeabilidad al oxígeno: Se eligieron las muestras de 5 cm provenientes de los testigos con este patrón de corte (Testigos B5R, B4R, B5A, B4D). Para ello se seleccionaron 3 muestras, una al principio, otra en el punto medio y otra al final de cada testigo. Luego se empacaron y se enviaron a analizar al laboratorio.
- b. Ultrasonido: Se eligieron las muestras de 9 cm provenientes de los testigos con este patrón de corte (Testigos B5L, B4L, B5D, B4A). Para ello se seleccionaron 3 muestras, una al principio, otra en el punto medio y otra al final de cada testigo. Luego se empacaron y se enviaron al laboratorio.
- c. Densidad y porosidad: Al igual que en el ensayo anterior, se eligieron 3 muestras de cada uno, pero incluyendo los testigos con patrones de corte de 9cms. En este caso, se tomaron como muestras las siguientes secciones de 9 cm y 5 cm que le seguían a las de los ensayos de permeabilidad y ultrasonido.

3.3.8.- Tinción selectiva:

La metodología para la tinción selectiva de las muestras de los testigos, se detalla a continuación para los 4 tipos de tinciones seleccionadas. En nuestro caso de estudio realizamos 2 tinciones a cada muestra:

- Primera tinción:
 - Sulfatos: Testigos B5L, B4L, B4D, B4A.
 - PH: Testigos B5R, B4R, B5A, B5D.
- Segunda tinción:
 - Calcio: Testigos B5L, B4L, B4D, B4A.
 - Potasio: Testigos B5R, B4R, B5A, B5D.

3.3.8.1.- Metodología para la tinción selectiva de las muestras

Reacción álcali-árido:

Se utilizan dos disoluciones para remarcar las aureolas características de esta reacción y tener un contraste visual más marcado. La primera disolución (cobaltonitrito sódico) remarca de amarillo el gel más rico en potasio, mientras que la posterior adición de Rodamina B tiñe de rosa el gel más rico en calcio.

Tinción de Potasio:

La determinación cualitativa de potasio se realiza mediante cobaltonitrito sódico. La reacción entre este compuesto y el potasio da lugar a una coloración amarilla. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Preparar una disolución saturada de cobaltonitrito sódico (50g/L).
- Sumergir la muestra en dicha disolución durante 3 minutos.
- Lavar el material con agua destilada.

La disolución de cobaltonitrito sódico es muy inestable ya que el ión nitrito se descompone y produce vapores nitrosos. Por este motivo, el reactivo se debe preparar y ser utilizado dentro de un período de 3 a 4 días.

Tinción del Calcio:

La presencia de calcio se determina mediante Rodamina B. La unión de calcio con este reactivo da lugar a una coloración rosada. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Preparar una disolución saturada de Rodamina B (50g/L).
- Sumergir el material en dicha disolución durante 3 minutos.
- Lavar el material con agua destilada.

La disolución de Rodamina B es estable con el tiempo y se puede almacenar sin ningún riesgo.

Reacción Sulfática

Tinción de Sulfatos:

La determinación de sulfatos requiere de dos disoluciones reactivas: una disolución de nitrato de bario y permanganato de potasio, una segunda disolución de ácido oxálico. La reacción del bario con los sulfatos en presencia de permanganato de potasio da lugar a la formación de un precipitado de color rosado (BaSO_4). La posterior adición de ácido oxálico se encarga de eliminar cualquier resto de permanganato que no haya sido retenido en el precipitado. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Preparar una disolución de nitrato de bario y permanganato de potasio en proporción 2:1 para un contenido final en sólidos del 6% (nitrato de bario: 40g, ácido oxálico: 20g, 1 litro de agua destilada).
- Sumergir el material en la primera disolución (nitrato de bario) durante 3 minutos y luego escurrir la muestra.
- Sumergir nuevamente el material en la segunda disolución (ácido oxálico) durante 3 minutos.
- Lavar la muestra con agua destilada.

Tinción del pH:

Además del procedimiento de tinción de sulfatos, se utilizó una disolución de fenoftaleína para teñir el cambio de pH alrededor de los áridos.

El pH de la muestra se determina mediante la exposición de la muestra rociada con una disolución de fenolftaleína. Dado que el

hormigón tiene un pH entre 12,5 y 13,5, el material que presenta un valor de pH por encima de 8,4, se tiñe de color rosa, mientras que la parte de la muestra que se deja de teñir es porque su pH ha decaído ya sea por causas de carbonatación o por la acidificación provocada por la reacción sulfática interna. El procedimiento a seguir:

Preparar una disolución de fenolftaleína, alcohol etílico y agua destilada en proporciones: 2 g/ 140 ml/ 60 ml.

- Humedecer ligeramente la superficie de la muestra a teñir.
- Rociar con un atomizador la disolución de fenolftaleína y luego dejar que la muestra la absorba. Repetir el proceso varias veces hasta obtener una tinción uniforme de la muestra.
- Limpiar con una esponja húmeda los excesos, hasta que solo se vea el material que realmente ha sido teñido.

3.4.- Metodología para el análisis de imagen.

3.4.1.- Muestras sin tinción.

El proceso de análisis de imagen de las muestras sin tinción se basa en un proceso casi totalmente cualitativo. La descripción detallada de las superficies de las secciones cortadas involucra gran parte de la metodología de análisis.

Para poder analizar todas las imágenes, éstas se han agrupado en conjuntos de fotografías que pertenecen a segmentos del testigo. Cada testigo se ha dividido en 10 segmentos iguales, y a partir de esto se empezaron a sacar observaciones generales del conjunto de fotos que abarcan el segmento analizado. Las muestras que forman parte del conjunto son todas las secciones cortadas, abarcando las secciones de 2 cm, 5 cm y 9 cm. Ver *Anejo 2*, para la definición de los segmentos de cada testigo, y el *Anejo 3* para el listado de las imágenes pertenecientes a cada segmento.

Las características principales que se tomaron en cuenta al momento del análisis son:

- *Distribución de los áridos*: Distribución del tamaño de los áridos, forma de los áridos, color de los áridos y presencia de óxidos. Definición de términos cualitativos:
 - (0).*Forma*: irregular (aquellos áridos con bordes irregulares y rectos, provenientes de trituración en mina), redondeados (aquellos

áridos con bordes redondeados y curvos, usualmente provenientes de aluviones naturales).

(1). *Tamaño aproximado*: pequeños (< 1 cm), medianos (> 1 cm y < 4 cm), grandes (> 4 cm).

- *Presencia de coqueras*: Cantidad de coqueras (huecos pequeños generalmente circulares) presentes en la superficie de corte, y además si estas coqueras están o no llenas de algún precipitado. Términos de cantidad de coqueras:
 - (0). *Pocas coqueras*: 1-3 coqueras por sección.
 - (1). *Algunas coqueras*: 4-6 coqueras por sección.
 - (2). *Muchas*: Más de 7 por sección.

- *Falta de agregación*: Descripción de la interfaz entre la pasta del cemento y los áridos dentro de esta. Términos de agregación:
 - (0). *Agregación muy mala*: presencia de muchas cavidades sin pasta entre los áridos o pasta sin consistencia con áridos sin pasta.
 - (1). *Agregación mala*: cavidades sin pasta entre los áridos.
 - (2). *Agregación buena*: buena interfaz entre la pasta y los áridos.

- *Presencia de fisuras*: Observación de existencia de fisuras en la superficie, detallando si se encuentran en la pasta, en los áridos o inclusive en ambos. Descripción de la fisura, donde se inicia, forma de la fisura (transversal o longitudinal), coloración de la fisura y si hay o no precipitados en esta. Términos de cantidad de fisuras:
 - (0). *Ninguna*: No hay presencia de fisuras.
 - (1). *Pocas fisuras*: presencia de 1-2 fisuras por sección.
 - (2). *Algunas fisuras*: presencia de 3-4 fisuras por sección.
 - (3). *Muchas fisuras*: presencia de más de 5 fisuras por sección.

Por otro lado, como parte del análisis de las imágenes, se elaboró una escala cuantitativa que muestre el número promedio de fisuras presentes en una sección del testigo del segmento analizado. Estos resultados se presentan en una gráfica que tiene como eje x, la profundidad del segmento, y como eje y, el número de fisuras.

3.4.2.- Muestras con tinción.

A pesar de que la metodología de tinción de las muestras no es un proceso muy exacto, porque depende mucho de cómo reaccionan los reactivos de estas tinciones con los compuestos de los materiales en las muestras, se elaboró un

método cuantitativo para comparar las secciones pertenecientes a los diferentes segmentos. Cada testigo se dividió en 10 segmentos de igual longitud, y las imágenes se agruparon con este mismo parámetro.

3.4.2.1.- Tinción de sulfatos:

La reacción con los sulfatos con el proceso de la tinción da lugar a la formación de un precipitado de color rosado, este crea zonas teñidas, tanto en la pasta como en las fisuras y en los poros. Como procedimiento de análisis, se elaboró una escala del 0 al 5 para cuantificar el grado de afectación de la reacción. Se eligió 0 para las muestras que no presentan ninguna con tinción, y 5 para la sección más teñida de todas las tinciones de sulfatos. En la *Figura 3.7*, se presenta la escala que se utilizó para cuantificar esta tinción, y poder graficar y presentar los resultados de una manera más comparativa.

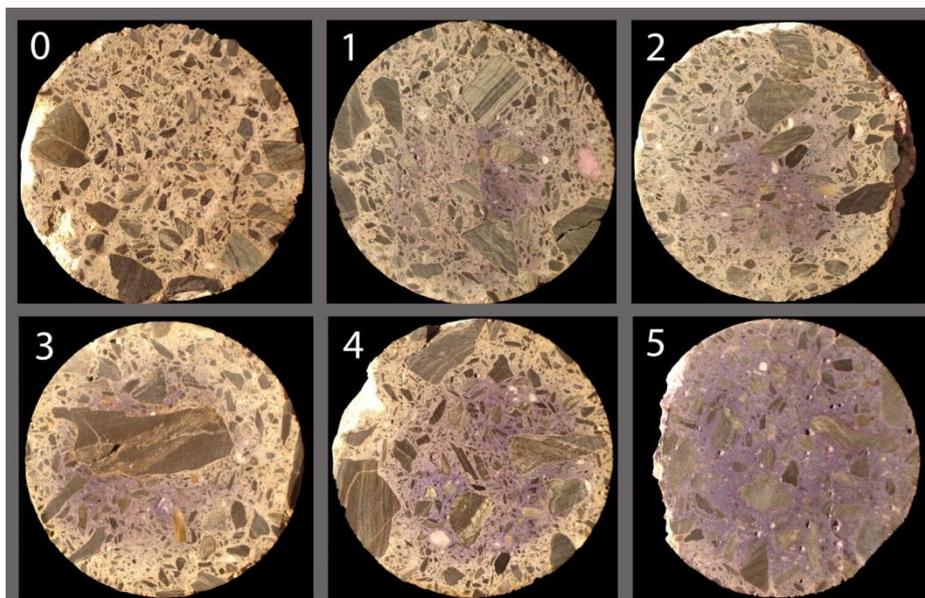


Figura 3.7.- Escala utilizada para el análisis de las muestras con tinción de sulfatos.

3.4.2.2.- Tinción del pH:

Como se había mencionado en la sección anterior, el material que presenta un pH por encima de 8,4, se tiñe de color rosa, mientras que lo demás permanece del mismo color inicial. Dado que el hormigón tiene un pH básico entre 12,5 y 13,5, toda el área de la sección que posee las características del material sin alteración se colorea, y las áreas decoloradas reflejan una caída del pH, y por ende una acidificación de esas zonas que es característica de la reacción sulfática interna.

Tomando esto en consideración, el procedimiento de análisis consiste en determinar si hay o no aureolas que presentan decoloraciones alrededor de los áridos reactivos. Luego estos datos se presentarán en una tabla. La *Figura 3.8*, sirve como ejemplo de una sección que presenta las características de los halos decolorados por la disminución del pH.

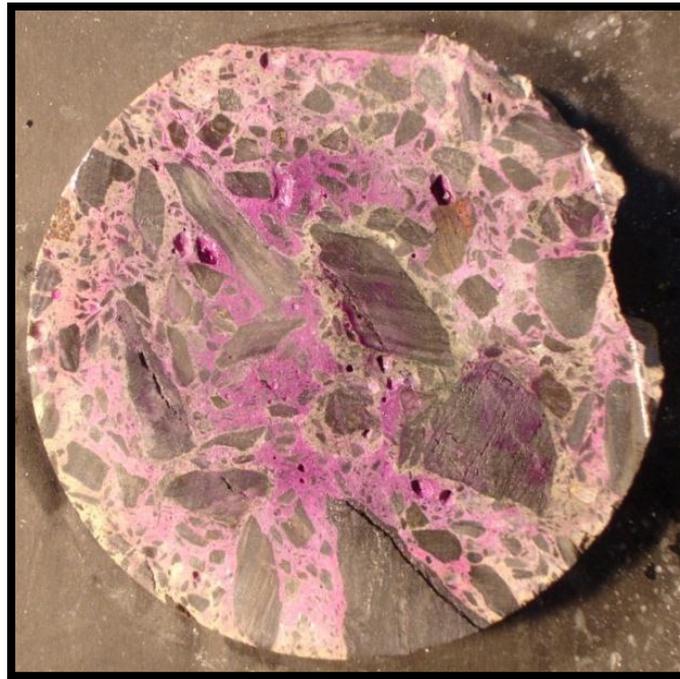


Figura 3.8.- Imagen de la tinción del pH que presenta halos decolorados entorno a los áridos.

3.4.2.3.- Tinción del calcio:

En esta tinción, la metodología a seguir es similar a la tinción del pH, pero con la diferencia de que lo que se considera en la observación es la coloración más intensa alrededor de los áridos, de las fisuras y de los poros. La presencia de calcio tiñe de color más intenso las fisuras, los poros y la interfaz entre el árido y la pasta que presentan este precipitado. Por este motivo, el procedimiento de análisis consiste en determinar si hay o no aureolas en la interfaz alrededor de los áridos que presentan coloraciones más intensas.

Luego estos datos se presentarán en una tabla. En la *Figura 3.9*, se observa un ejemplo de una muestra que presenta halos con un color rosa más intenso, y algunos poros que también tienen esta coloración.



Figura 3.9.- Imagen que muestra la tinción del calcio con algunos poros e interfaz coloreada de color rosa.

3.4.2.4.- Tinción del potasio:

Por último, la metodología de análisis de la tinción del potasio presente en las muestras, consiste también, al igual que en la tinción del calcio, en observar la coloración, pero en este caso el color amarillo, en las fisuras de la muestra. Tomando el mismo criterio que en la metodología de análisis de las muestras sin tinción, establecimos la siguiente escala:

- (4). *Ninguna*: No hay presencia de fisuras teñidas.
- (5). *Pocas fisuras*: presencia de 1-2 fisuras teñidas por sección.
- (6). *Algunas fisuras*: presencia de 3-4 fisuras teñidas por sección.
- (7). *Muchas fisuras*: presencia de más de 5 fisuras teñidas por sección.

El procedimiento de análisis consiste en contar estas aureolas, poros y fisuras que presentan la coloración. Luego estos datos se graficarán, en una escala que tiene como eje x, la profundidad del segmento, y como eje y, la el valor de la escala de fisuras observadas de coloración amarilla. La *Figura 3.10*, muestra un ejemplo de una muestra con presencia de potasio en algunas fisuras de color amarillo.



Figura 3.10.- Imagen de una muestra de tinción de potasio, con fisuras en la interfaz teñidas de color amarillo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE MUESTRAS

4.1.- Introducción

En este capítulo trataremos el análisis de todas las imágenes que se obtuvieron mediante la documentación fotográfica. Las imágenes analizadas son de las muestras sin tinción y con las tinciones realizadas en ellas. Estos análisis se hicieron siguiendo la metodología detallada en capítulo 3.

Como se estableció en el capítulo 3, las muestras se analizarán agrupándolas en 10 segmentos de igual longitud por cada testigo analizado. Los análisis se organizarán por el método de caracterización utilizado, ya sean muestras sin tinción o con sus respectivas tinciones. La información se tratará de simplificar mediante el uso de tablas, y se graficarán muchos de los datos de modo que sea de fácil entendimiento para el lector.

Además, analizaremos las muestras que se sometieron a los ensayos de ultrasonido, permeabilidad al O₂, densidad y porosidad.

4.2.- Objetivos

Los objetivos de este capítulo son en esencia el procesamiento de toda la información obtenida en la campaña experimental que se hizo en esta tesina, con el propósito de tener una idea comparativa de qué sucede en cada testigo con relación a la reacción expansiva que le afecta.

4.3.- Análisis de imagen

4.3.1.- Muestras sin tinción

Las muestras sin tinción se analizaron de acuerdo a las características mencionadas en el capítulo 3, y estos análisis sirvieron de base para elaborar 8 tablas correspondientes a los 8 testigos extraídos de la presa. Para el análisis de las tablas, los testigos se agruparon en:

- Testigos de paramento: B5L, B4L, B5R y B4R.
- Testigos de galería superior: B5A y B4A.
- Testigos de galería inferior: B5D y B4D.

A continuación se presentan las *Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8*, elaboradas tabulando metodológicamente las características de las imágenes analizadas.

TESTIGO B5L

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueas		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,19	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, halos blancos	Pocas	Llenas de gel blanco, y vacías	Buena	Pocas	Árido (transv., long.), y en la interfaz
2	0,20	0,39	Grand., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, halos blancos	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Árido (Long.), se extiende a la pasta con gel blanco
3	0,40	0,58	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (transv., long.), y en la interfaz
4	0,59	0,77	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Algunas	Árido (transv.), se extiende a la pasta con óxido
5	0,78	0,97	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Buena	Algunas	Árido (Transv.), con óxido
6	0,98	1,16	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Buena	Algunas	Árido (Long.), interfaz con gel blanco
7	1,17	1,35	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Mala	Algunas	Árido (Long.)
8	1,36	1,54	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Algunas	Árido Med. (Long.)
9	1,55	1,74	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Mala	Pocas	Árido Med. (Long.)
10	1,75	1,93	Grand., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido, halo blanco	Muchas	Vacías	Mala	Pocas	Árido Grand. (Long.) con gel blanco

Tabla 4.1.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B5L.

TESTIGO B4L

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueras		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,30	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Interfaz, gel blanco
2	0,31	0,59	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Muchas	Árido (transv., long.), extiende a la pasta, color marrón
3	0,60	0,89	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Muchas	Árido (transv., long.), extiende a la pasta, color marrón
4	0,90	1,18	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel	Buena	Algunas	Árido (transv., long.)
5	1,19	1,48	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Mala	Pocas	Árido (long.)
6	1,49	1,78	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Mala	Muchas	Árido (transv., long.) con óxido, interfaz con gel blanco, ext. a la pasta
7	1,79	2,07	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Vacías	Buena	Pocas	Árido (transv., long.) con óxido
8	2,08	2,37	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (transv.), extiende en la pasta
9	2,38	2,66	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (transv., long.), interfaz
10	2,67	2,96	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (long.)

Tabla 4.2.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B4L.

TESTIGO B5R

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueas		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,22	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Algunas	Árido (long.) con óxido, interfaz
2	0,23	0,59	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Muchas	Árido (transv.,long.), interfaz, extiende el la pasta con gel blanco
3	0,60	0,66	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Muchas	Árido (transv.,long.), interfaz, extiende el la pasta con gel blanco
4	0,67	0,88	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Vacías	Buena	Algunas	Árido (transv.,long.)
5	0,89	1,10	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Árido (transv.,long.), interfaz, gel blanco
6	1,11	1,31	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunass	Vacías	Buena	Pocas	Árido (long.), interfaz
7	1,32	1,53	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocass	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Algunas	Árido (transv., long.) se extiende en la pasta con gel blanco
8	1,54	1,75	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (long.) se extiende en la pasta, interfaz
9	1,76	1,97	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (transv., long.)
10	1,98	2,19	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (long.), interfaz

Tabla 4.3.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B5R.

TESTIGO B4R

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueras		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,24	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Áridos (long.), interfaz se extiende en la pasta
2	0,25	0,47	Grand., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Áridos (transv., long.), interfaz, extiende en la pasta
3	0,48	0,71	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Árido (long.)
4	0,72	0,94	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Áridos (transv., long.) se extiende en la pasta
5	0,95	1,18	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Áridos (transv., long.)
6	1,19	1,41	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Áridos (transv., long.)
7	1,42	1,65	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Áridos (transv., long.)
8	1,54	1,75	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Vacías	Buena	Pocas	Áridos (transv., long.)
9	1,76	1,97	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Áridos (transv., long.), interfaz se extiende a la pasta
10	1,98	2,35	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (long.), interfaz se extiende a la pasta

Tabla 4.4.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B4R.

TESTIGO B5A

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueras		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,24	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
2	0,25	0,48	Grand., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
3	0,49	0,72	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
4	0,73	0,96	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (long.)
5	0,97	1,20	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
6	1,21	1,44	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
7	1,45	1,68	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Interfaz
8	1,69	1,92	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Ninguna	
9	1,93	2,16	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
10	2,17	2,41	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (long.)

Tabla 4.5.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B5A.

TESTIGO B5D

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueras		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,45	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Algunas	Vacías	Mala	Ninguna	
2	0,46	0,91	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Muchas	Vacías	Muy mala	Ninguna	
3	0,92	1,36	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Ninguna	
4	1,37	1,81	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Mala	Ninguna	
5	1,82	2,27	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Muy mala	Pocas	Árido (long.)
6	2,28	2,72	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (long.)
7	2,73	3,17	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Pocas	Llenas de gel blanco en áridos y vacías	Buena	Pocas	Árido (long.) con gel blanco
8	3,18	3,62	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Mala	Pocas	Árido (transv.)
9	3,63	4,08	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (long.) se extiende en la pasta
10	4,09	4,53	Grand., Med., Peq.	Redondo	Marrón, amarillo, rojo, gris	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Áridos (transv.) con gel blanco

Tabla 4.6.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B5D.

TESTIGO B4A

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueiras		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,29	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (transv., long.)
2	0,30	0,58	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Árido (transv., long.)
3	0,59	0,87	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
4	0,88	1,16	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Ninguna	
5	1,17	1,45	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Ninguna	
6	1,46	1,74	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Árido (transv.)
7	1,75	2,03	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Ninguna	
8	2,04	2,32	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco y en interfaz	Buena	Pocas	Árido (transv., long.)
9	2,33	2,61	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Algunas	Árido (transv., long.) se extiende en la pasta
10	2,62	2,90	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y en interfaz	Mala	Ninguna	

Tabla 4.7.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B4A.

TESTIGO B4D

Segmento	Coordenadas X (m)		Distribución Áridos			Coqueas		Agregación	Fisuras	
	Inicial	Final	Tamaño	Forma	Color	Cantidad	Descripción	Descripción	Cantidad	Ubicación y Observ.
1	0,00	0,51	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco en interfaz y vacías	Buena	Pocas	Árido (transv.) con gel blanco
2	0,52	1,01	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Mala	Ninguna	
3	1,02	1,52	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Muchas	Llenas de gel blanco en interfaz y vacías	Mala	Pocas	Árido (long.)
4	1,53	2,02	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Muy mala	Ninguna	
5	2,03	2,53	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Algunas	Llenas de gel blanco en interfaz y vacías	Buena	Ninguna	
6	2,54	3,03	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Algunas	Llenas de gel blanco en interfaz y vacías	Mala	Ninguna	
7	3,04	3,54	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Muchas	Llenas de gel blanco y vacías	Muy mala	Pocas	Áridos (transv., long.)
8	3,55	4,04	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro, manchas óxido	Algunas	Llenas de gel blanco y en interfaz	Buena	Pocas	Áridos (transv., long.)
9	4,05	4,55	Grand., Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Pocas	Llenas de gel blanco y vacías	Buena	Pocas	Áridos (transv.)
10	4,56	5,05	Med., Peq.	Irregular	Gris claro, gris oscuro	Pocas	Llenas de gel blanco	Buena	Pocas	Áridos (transv.)

Tabla 4.8.- Descripción tabulada de las muestras sin tinción del testigo B4D.

4.3.1.1.- Distribución de áridos

En los testigos de paramento (B5L, B4L, B5R Y B4R), se observa una distribución de los áridos muy aleatoria que abarca los tamaños pequeños, medianos y grandes. Sin embargo, en los testigos del bloque 4 (B4L y B4R) se percibe en el último metro, una disminución del tamaño de los áridos, habiendo sólo de tamaño medianos y grandes.

En los testigos de galería ascendentes (B5A y B4A), se observa una distribución bastante uniforme de los áridos de todos los tamaños. Sin embargo, existen algunos segmentos del testigo B4A que solo presenta áridos medianos y pequeños.

En los testigos de galería descendentes (B5D y B4D), se observan las mismas características que en los testigos de galería ascendente, con áridos medianos y pequeños en algunos segmentos del testigo del bloque 4 (B4D).

En general, todos los testigos varían muy aleatoriamente el tamaño de los áridos y las formas de estos son totalmente irregulares. En cuanto a la forma, se puede apreciar que el bloque 4 tiene áridos de menor escala. Por otro lado, el color de los áridos en general varía entre un gris claro y un gris oscuro, presentando manchas de óxidos dentro de los áridos en casi todos los segmentos, indicando vetas de metales oxidados en los propios áridos.

4.3.1.2.- Presencia de coqueras

La presencia de coqueras se graficó de acuerdo a los datos tabulados y se le asignó valores del 1 al 3 de la siguiente manera:

- (1). Pocas coqueras: 1-3 coqueras por sección.
- (2). Algunas coqueras: 4-6 coqueras por sección.
- (3). Muchas: Más de 7 coqueras por sección.

Las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 muestran las gráficas de estos datos tabulados con respecto a la profundidad media de cada uno de los 10 segmentos analizados.

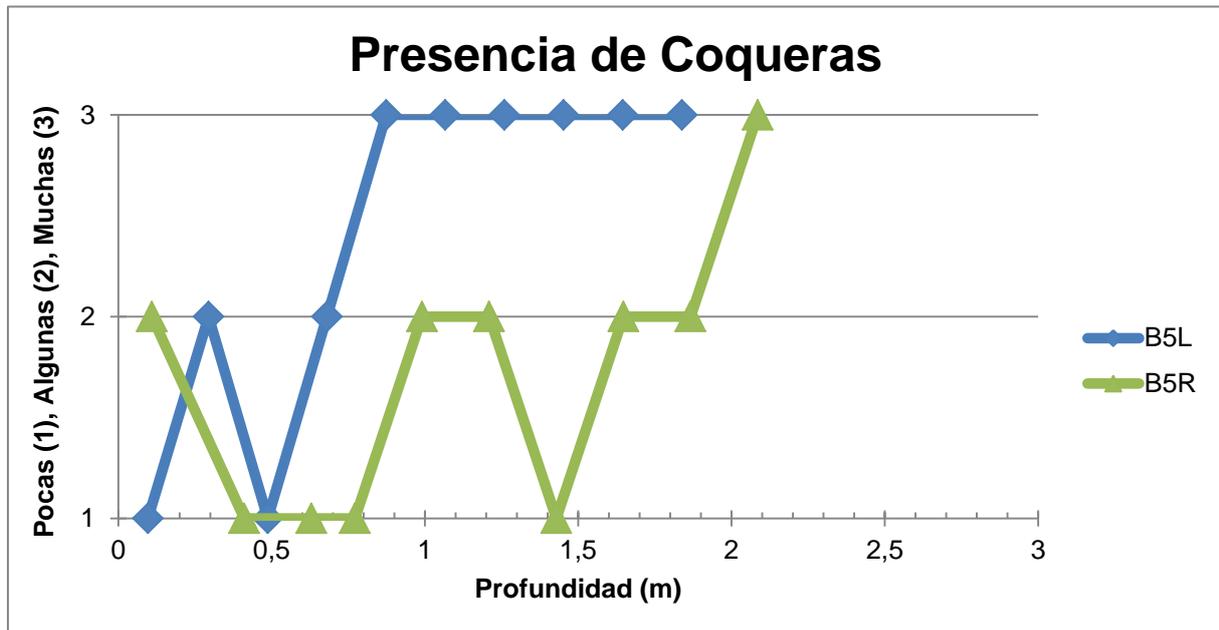


Figura 4.1.- Gráfica de la cantidad de coqueras presentes en las muestras de los testigos de paramento del bloque de hormigonado 5.

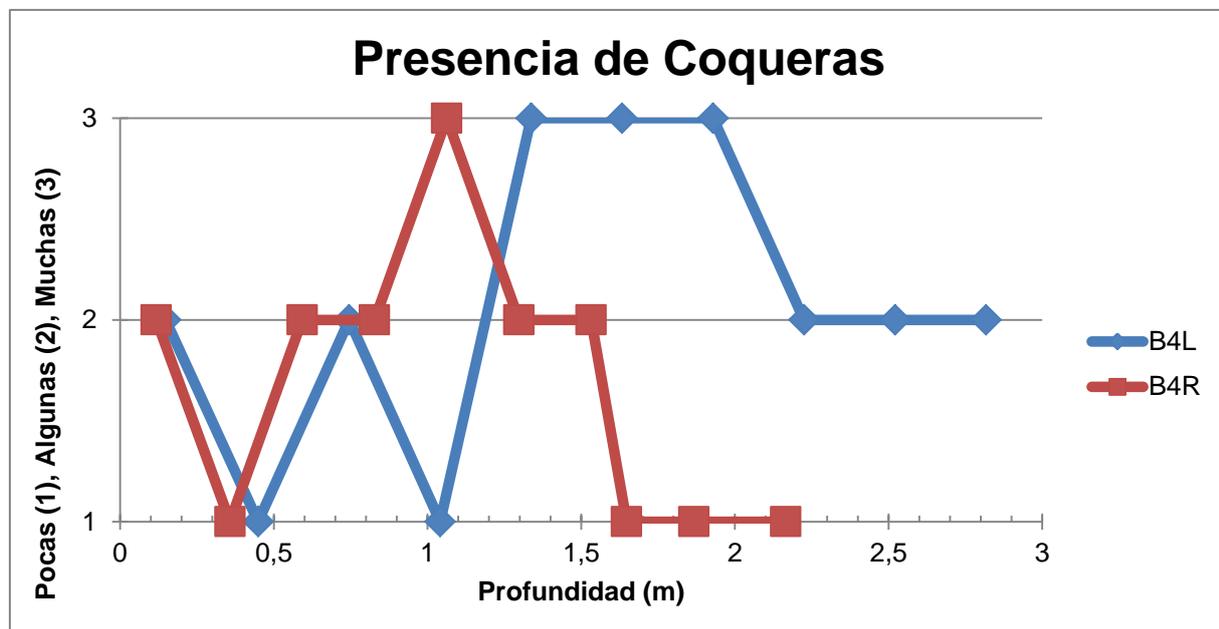


Figura 4.2.- Gráfica de la cantidad de coqueras presentes en las muestras de los testigos de paramento del bloque de hormigonado 4.

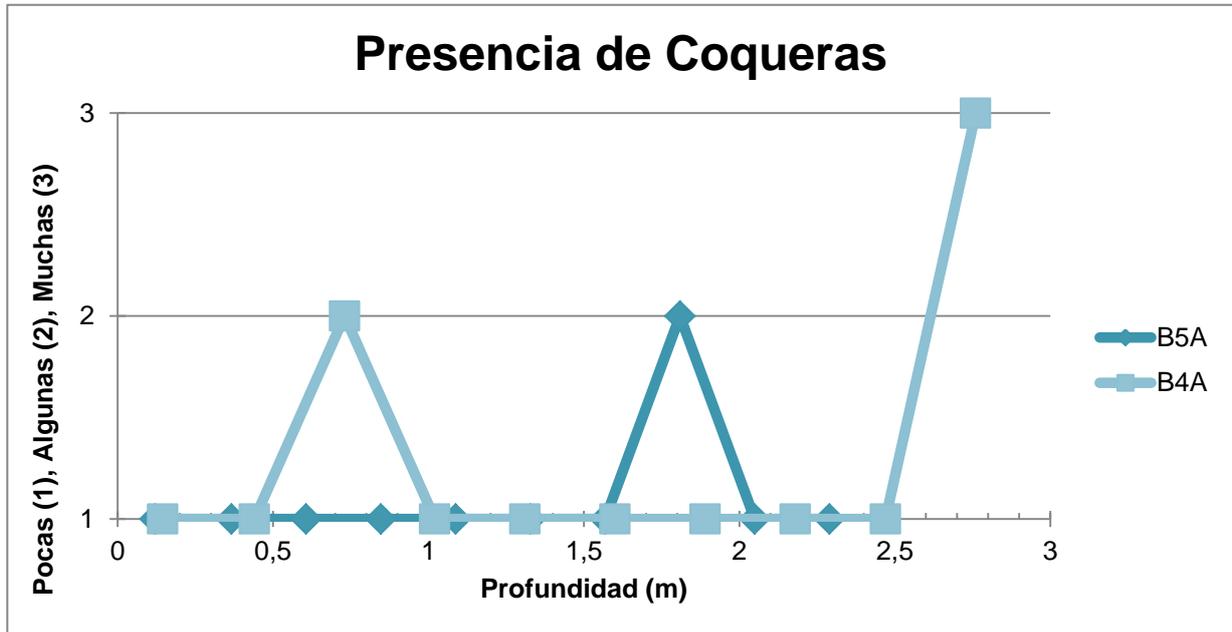


Figura 4.3.- Gráfica de la cantidad de coqueras presentes en las muestras de los testigos ascendentes en galería del bloque de hormigonado 4 y 5.

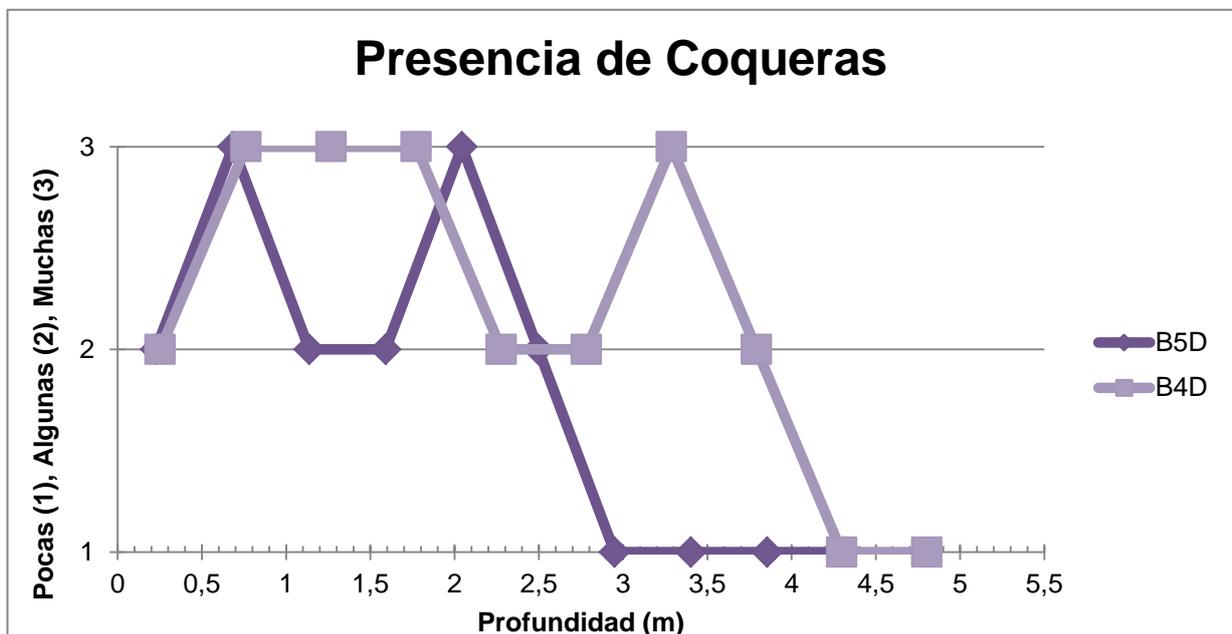


Figura 4.4.- Gráfica de la cantidad de coqueras presentes en las muestras de los testigos descendentes en galería del bloque de hormigonado 4 y 5.

En los testigos de paramento (B5L, B4L, B5R Y B4R), se observa presencia de coqueras que varía sin ninguna norma en términos generales, entre pocas, algunas y muchas, a lo largo de la profundidad del testigo. Sin embargo, en los testigos del bloque 5 la línea de tendencia de la gráfica, es de ir aumentando las coqueras a medida que avanzan en profundidad. Por otro lado, los testigos del bloque 4 empiezan a variar aleatoriamente la cantidad de coqueras en el primer metro, y luego difieren totalmente en las profundidades finales.

En los testigos de galería ascendentes (B5A y B4A), se observa una misma tendencia de ninguna coquera en ambos testigos, con relación a la profundidad estudiada. Y además, casi todas las coqueras están llenas de gel blanco.

En los testigos de galería descendentes (B5D y B4D), se observan coqueras en los primeros metros, y luego al final de estos, la norma tiende a presentar pocas coqueras en las muestras de los testigos. Y además, casi todas las coqueras están llenas de gel blanco.

En general, se puede decir que los testigos de paramento y los testigos de galería descendentes de ambos bloques son los que más presencia de coqueras poseen. Además, observando los datos tabulados, los testigos de paramento poseen la mayoría de sus coqueras de los segmentos iniciales y finales llenas de gel blanco. Por otro lado, casi todos los segmentos de los testigos extraídos de galería, poseen coqueras llenas de gel blanco, y muchos de los segmentos pertenecientes a los de galería del bloque 4, tienen coqueras en la interfaz árido-pasta, y llenas de gel blanco, indicando una posible reacción álcali-árido

4.3.1.3.- Agregación de la pasta

En general, casi todos los segmentos analizados presentaron una buena agregación. Y los únicos segmentos que tuvieron una discordancia con esta buena agregación entre la pasta y los áridos, pertenecen a los testigos descendentes de galería.

4.3.1.4.- Presencia de fisuras

La presencia de fisuras se graficó de acuerdo a los datos tabulados y se le asignó valores del 0 al 3 de la siguiente manera:

- (0).Ninguna fisura: 0 fisuras por sección.
- (1).Pocas fisuras: 1-2 fisuras por sección.
- (2).Algunas coqueras: 3-4 fisuras por sección.
- (3).Muchas: Más de 5 fisuras por sección.

Las Figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las gráficas de estos datos tabulados con respecto a la profundidad media de cada uno de los 10 segmentos analizados.

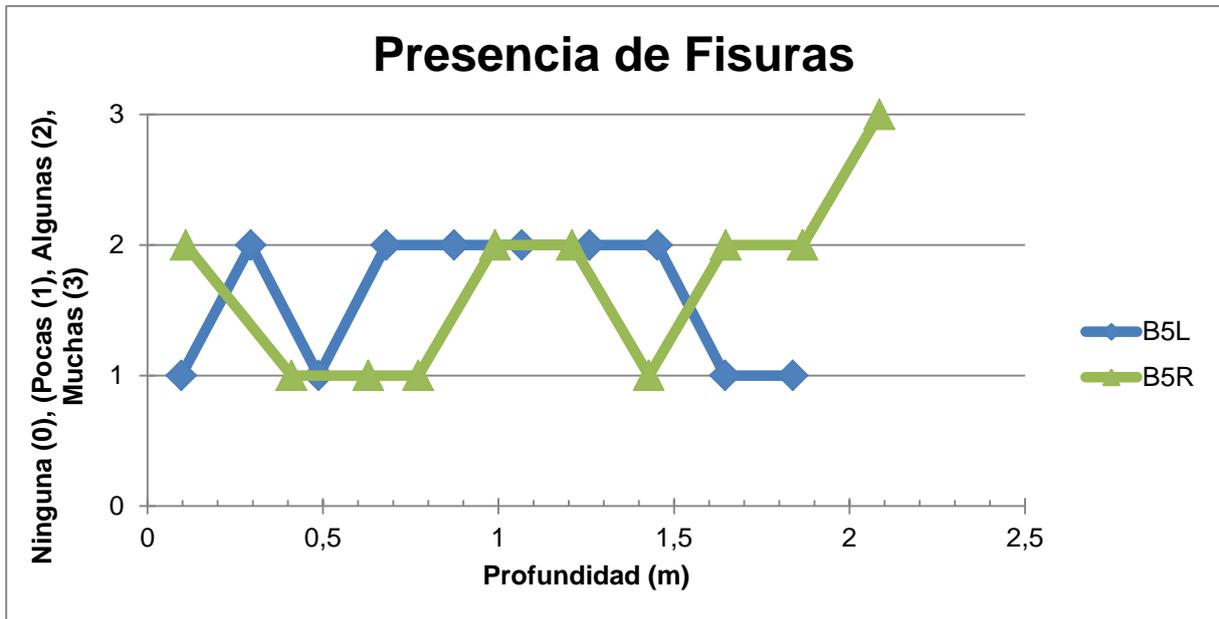


Figura 4.5.- Gráfica de la cantidad de fisuras presentes en las muestras de los testigos de paramento del bloque de hormigonado 5.

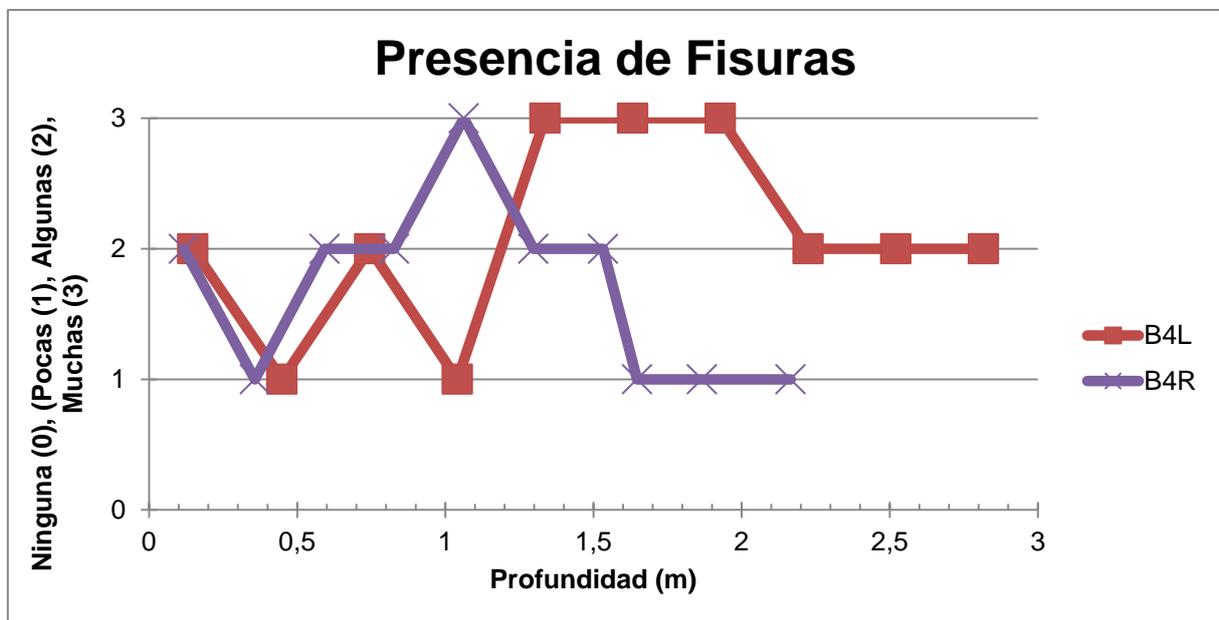


Figura 4.6.- Gráfica de la cantidad de fisuras presentes en las muestras de los testigos de paramento del bloque de hormigonado 4.

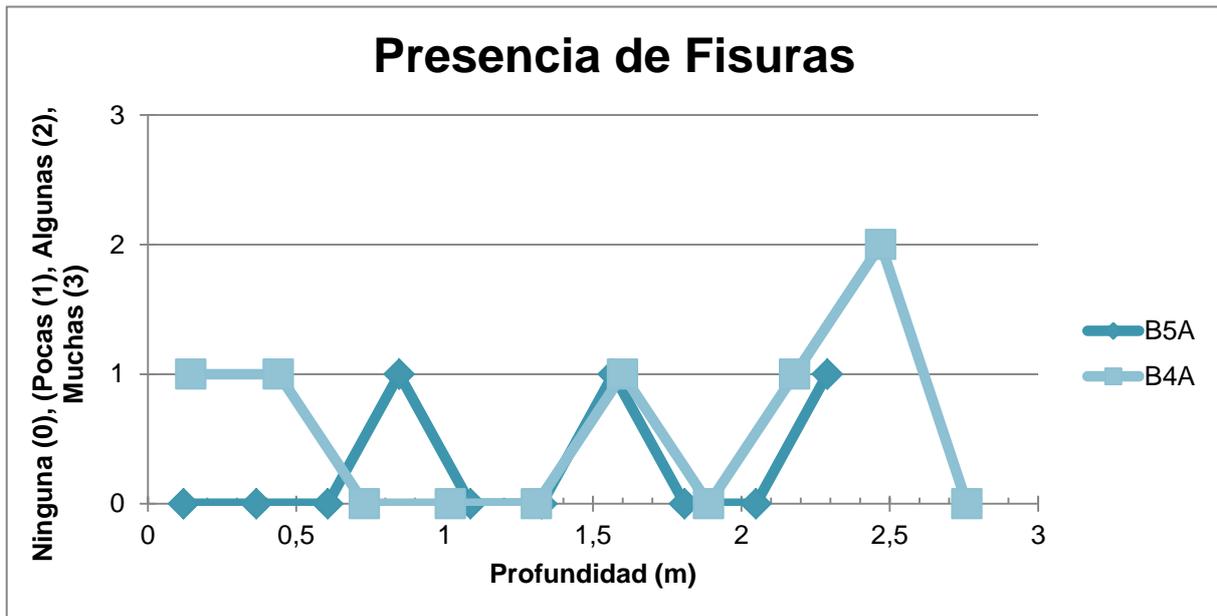


Figura 4.7.- Gráfica de la cantidad de fisuras presentes en las muestras de los testigos ascendentes en galería del bloque de hormigonado 4 y 5.

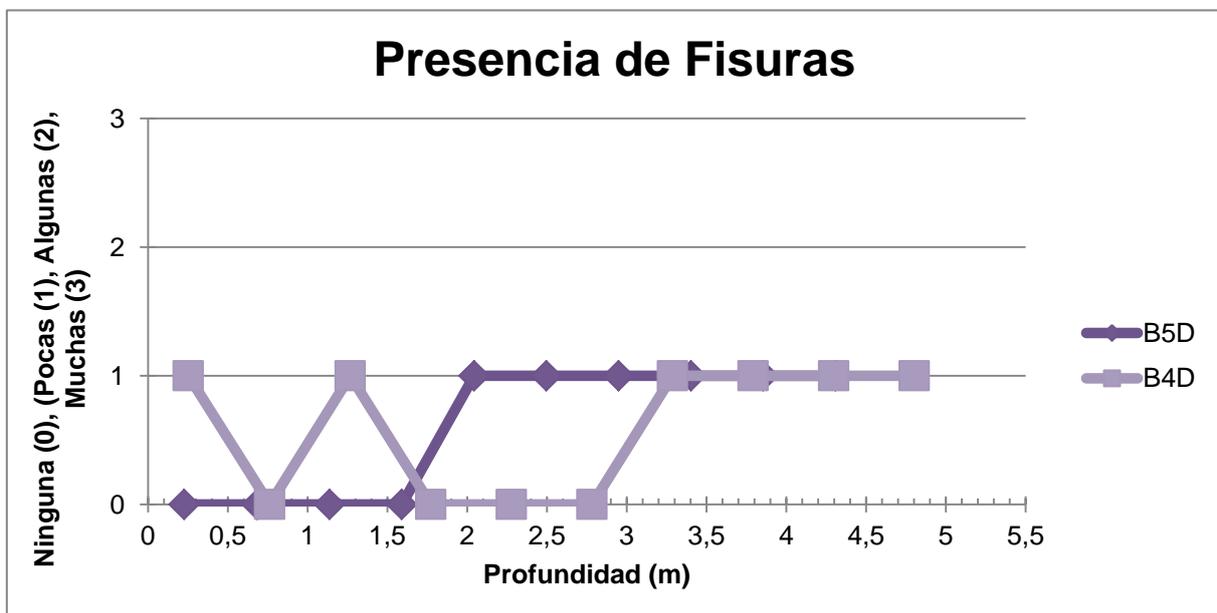


Figura 4.8.- Gráfica de la cantidad de fisuras presentes en las muestras de los testigos descendentes en galería del bloque de hormigonado 4 y 5.

En los testigos de paramento (B5L, B4L, B5R Y B4R), existen muchas fisuras, y por lo general, estas fisuras aparecen de forma transversal y longitudinal en los áridos grandes y medianos. Además, estas fisuras se producen casi siempre en el sentido de la veta de los áridos, y la mayoría de ellos presentan manchas de óxido, indicando la posibilidad de áridos reactivos y una reacción sulfática interna. Estas fisuras que se originan en los áridos, en algunos casos, se extienden en la pasta.

En los testigos de galería ascendentes (B5A y B4A), existen pocas fisuras o ninguna. Las fisuras que se observan se encuentran en los áridos de forma transversal y longitudinal, y se observó en un segmento una fisura en la interfaz de uno de los áridos.

En los testigos de galería descendentes (B5D y B4D), al igual que en los testigos de galería ascendentes, existen pocas fisuras o ninguna. También se encuentran en los áridos de la misma forma, pero la presencia de fisuras tiende a aumentar ligeramente con la profundidad del testigo. Además, se observó que en muchas de las fisuras presentes en estos testigos descendentes aparecían precipitados de un gel de color blanco.

En general, los testigos de paramento son los más afectados por fisuraciones, en especial el bloque 4, que es el que más cantidad de fisuras posee por muestra. Por otro lado, los testigos de galería casi no presentan fisuras, y los que sí poseen, por lo general no se extienden en la pasta. Por otro lado, los testigos de galería no presentan casi fisuración, pero algunas de las fisuras que se pueden observar poseen un precipitado de color blanco, indicando una posible reacción álcali-sílice.

4.3.2.- Muestras con tinción

4.3.2.1.- Tinción de sulfatos

Las muestras se analizaron de la forma en que se estableció en el capítulo 3, mediante la escala de sulfatos establecida. En la *Tabla 4.9* se presentan los datos obtenidos luego de analizar las tinciones en las superficies de las muestras de 2 cm de todos los testigos. Estos datos se graficaron con respecto a la profundidad promedio de los segmentos de cada testigo.

TESTIGO B5L			
Segmento	Coord. X (m)		Escala Sulfatos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,19	3
2	0,20	0,39	5
3	0,40	0,58	1
4	0,59	0,77	2
5	0,78	0,97	3
6	0,98	1,16	3
7	1,17	1,35	3
8	1,36	1,54	2
9	1,55	1,74	2
10	1,75	1,93	2

TESTIGO B4L			
Segmento	Coord. X (m)		Escala Sulfatos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,30	3
2	0,31	0,59	1
3	0,60	0,89	1
4	0,90	1,18	2
5	1,19	1,48	2
6	1,49	1,78	2
7	1,79	2,07	1
8	2,08	2,37	1
9	2,38	2,66	1
10	2,67	2,96	1

TESTIGO B5A			
Segmento	Coord. X (m)		Escala Sulfatos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,24	2
2	0,25	0,48	3
3	0,49	0,72	2
4	0,73	0,96	3
5	0,97	1,20	1
6	1,21	1,44	1
7	1,45	1,68	2
8	1,69	1,92	3
9	1,93	2,16	2
10	2,17	2,41	3

TESTIGO B4D			
Segmento	Coord. X (m)		Escala Sulfatos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,51	2
2	0,52	1,01	3
3	1,02	1,52	3
4	1,53	2,02	4
5	2,03	2,53	3
6	2,54	3,03	2
7	3,04	3,54	3
8	3,55	4,04	3
9	4,05	4,55	3
10	4,56	5,05	2

Tabla 4.9.- Datos obtenidos de la tinción de sulfatos.

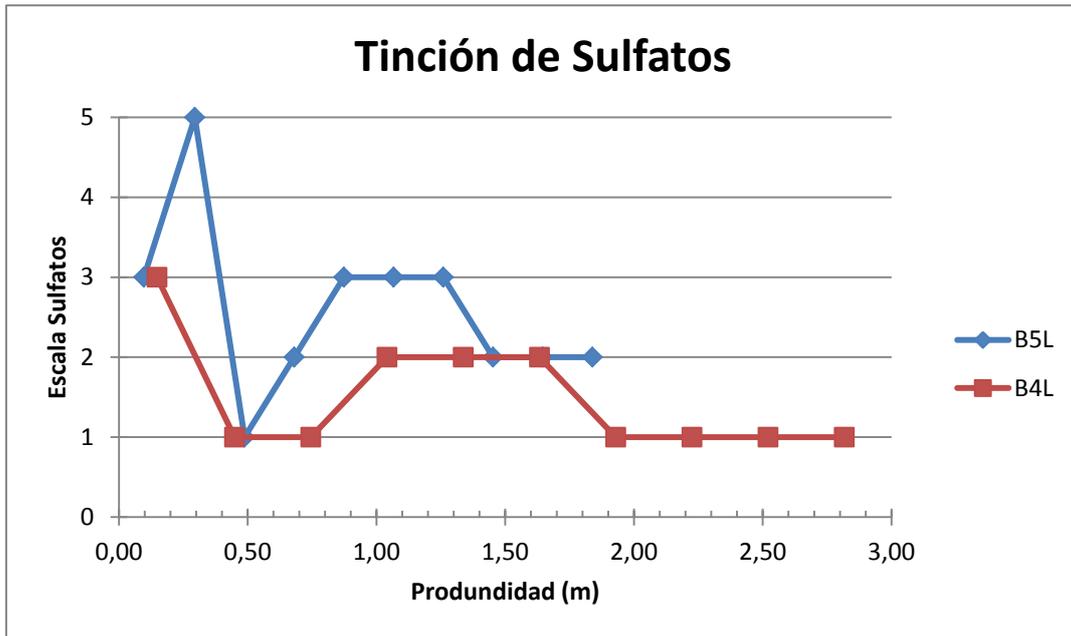


Figura 4.9.- Gráfica de la tinción de sulfatos de los testigos de paramento del bloque 4 y 5.

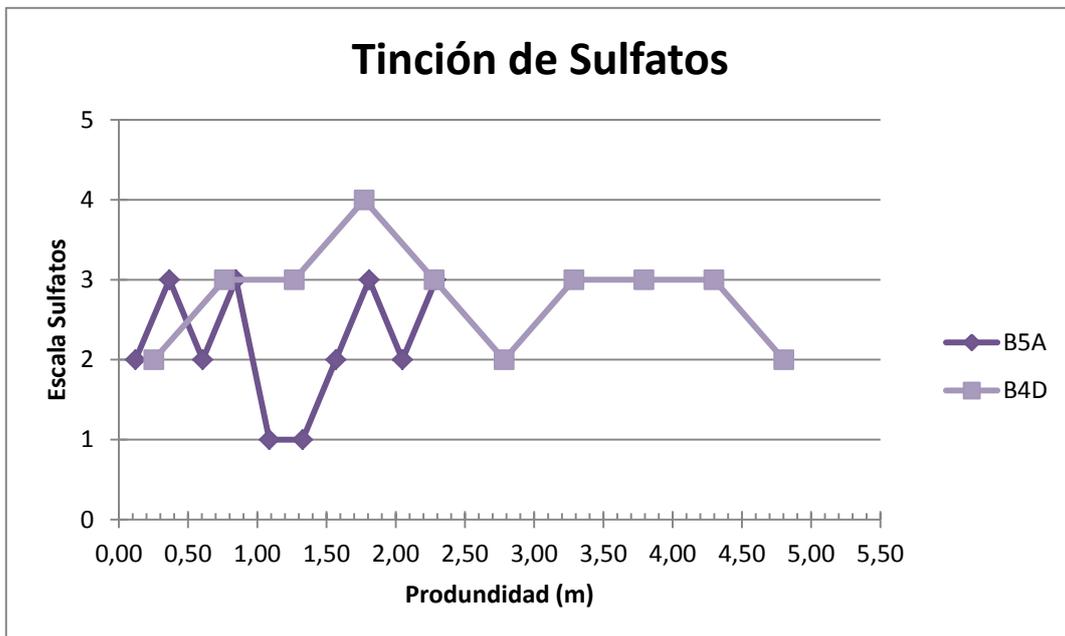


Figura 4.10.- Gráfica de la tinción de sulfatos de los testigos de galería del bloque 4 y 5.

En los testigos de paramento (B5L y B4L), las gráficas presentan valores con cierta variación, pero la tendencia es de ir disminuyendo a medida que el testigo se hace más profundo.

En los testigos de galería ascendente y descendente (B5A y B4D), se observa una variación mucho más aleatoria que en los testigos de paramento. La media de los valores de estos testigos está entre los valores 2 y 3, indicando cierta presencia de sulfatos, inclusive en profundidades de 3 a 4 metros.

En general, la mayoría de las muestras analizadas, tienen presencia de sulfatos. Por otro lado, los testigos de paramento, disminuyen la presencia de sulfatos a medida que se analizan los segmentos más profundos. Este comportamiento de disminución de sulfatos a medida que se profundiza en la estructura del paramento, es propio de las reacciones sulfáticas internas.

4.3.2.2.- Tinción del pH

Las muestras se analizaron de la forma en que se estableció en el capítulo 3, observando si se presentan o no se presentan halos de decoloración alrededor de los áridos. En la *Tabla 4.10* se presentan los datos obtenidos luego de analizar las tinciones en las superficies de las muestras de 2 cm de todos los testigos.

TESTIGO B5R			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,22	NO
2	0,23	0,59	SI
3	0,60	0,66	SI
4	0,67	0,88	SI
5	0,89	1,10	SI
6	1,11	1,31	SI
7	1,32	1,53	SI
8	1,54	1,75	SI
9	1,76	1,97	SI
10	1,98	2,19	SI

TESTIGO B4R			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,24	NO
2	0,25	0,47	SI
3	0,48	0,71	SI
4	0,72	0,94	SI
5	0,95	1,18	SI
6	1,19	1,41	NO
7	1,42	1,65	SI
8	1,54	1,75	NO
9	1,76	1,97	SI
10	1,98	2,35	SI

TESTIGO B5D				TESTIGO B4A			
Segmento	Coord. X (m)		Halos	Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final			Inicial	Final	
1	0,00	0,45	NO	1	0,00	0,29	NO
2	0,46	0,91	NO	2	0,30	0,58	NO
3	0,92	1,36	SI	3	0,59	0,87	NO
4	1,37	1,81	SI	4	0,88	1,16	NO
5	1,82	2,27	SI	5	1,17	1,45	NO
6	2,28	2,72	NO	6	1,46	1,74	NO
7	2,73	3,17	NO	7	1,75	2,03	NO
8	3,18	3,62	NO	8	2,04	2,32	NO
9	3,63	4,08	NO	9	2,33	2,61	NO
10	4,09	4,53	NO	10	2,62	2,90	NO

Tabla 4.10.- Datos obtenidos de la tinción del pH.

En los testigos de paramento (B5R Y B4R), existen halos de decoloración en casi todas las muestras, excluyendo sólo 1 segmento del testigo B5R y 3 segmentos del testigo B4R. Estos halos coinciden con muchos de los áridos que presentan fisuras, indicando una reacción entre el árido y la pasta de tipo sulfática interna.

En los testigos de galería ascendente y descendente (B5D y B4A), se observan muy pocos halos de decoloración. El testigo del bloque 4 no muestra ni un sólo halo. Mientras que el testigo descendente del bloque 5 posee halos en los segmentos 3, 4 y 5.

En general, la presencia de halos de decoloración debido a la reacción sulfática interna, ocurre en los testigos de paramento de ambos bloques.

4.3.2.3.- Tinción del calcio

Las muestras se analizaron de la forma en que se estableció en el capítulo 3, observando si se presentan o no se presentan halos de coloración más intensa alrededor de los áridos. En la *Tabla 4.11* se presentan los datos obtenidos luego de analizar las tinciones en las superficies de las muestras de 2 cm de todos los testigos.

TESTIGO B5L			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,19	NO
2	0,20	0,39	NO
3	0,40	0,58	NO
4	0,59	0,77	NO
5	0,78	0,97	NO
6	0,98	1,16	NO
7	1,17	1,35	NO
8	1,36	1,54	NO
9	1,55	1,74	NO
10	1,75	1,93	SI

TESTIGO B4L			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,30	NO
2	0,31	0,59	NO
3	0,60	0,89	NO
4	0,90	1,18	NO
5	1,19	1,48	NO
6	1,49	1,78	SI
7	1,79	2,07	NO
8	2,08	2,37	SI
9	2,38	2,66	NO
10	2,67	2,96	SI

TESTIGO B5A			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,24	NO
2	0,25	0,48	SI
3	0,49	0,72	SI
4	0,73	0,96	NO
5	0,97	1,20	SI
6	1,21	1,44	SI
7	1,45	1,68	NO
8	1,69	1,92	NO
9	1,93	2,16	SI
10	2,17	2,41	SI

TESTIGO B4D			
Segmento	Coord. X (m)		Halos
	Inicial	Final	
1	0,00	0,51	NO
2	0,52	1,01	NO
3	1,02	1,52	NO
4	1,53	2,02	NO
5	2,03	2,53	NO
6	2,54	3,03	NO
7	3,04	3,54	NO
8	3,55	4,04	NO
9	4,05	4,55	NO
10	4,56	5,05	NO

Tabla 4.11.- Datos obtenidos de la tinción del calcio.

En los testigos de paramento (B5L Y B4L), existen muy pocos segmentos que presentan halos de coloración más intensa. Los segmentos que presentan los halos se encuentran a una profundidad de más de 1,5 metros.

En los testigos de galería ascendente y descendente (B5A y B4D), las observaciones fueron muy distintas entre cada testigo. El testigo descendente del bloque 4 no muestra ni un sólo halo, mientras que el testigo ascendente del bloque 5 posee halos en más de la mitad de los segmentos.

En general, la presencia de halos de coloración más intensa debido a la reacción álcali-sílice, se observa sólo en uno de los testigos de galería.

4.3.2.4.- Tinción del Potasio

La presencia de fisuras de color amarillo se graficó de acuerdo a los datos en la *Tabla 4.12*, y se les asignó valores del 0 al 3 de la siguiente manera:

- (0). *Ninguna*: No hay presencia de fisuras teñidas.
- (1). *Pocas fisuras*: presencia de 1-2 fisuras teñidas por sección.
- (2). *Algunas fisuras*: presencia de 3-4 fisuras teñidas por sección.
- (3). *Muchas fisuras*: presencia de más de 5 fisuras teñidas por sección.

Las *Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4* muestran las gráficas de estos datos tabulados con respecto a la profundidad media de cada uno de los 10 segmentos analizados.

TESTIGO B5R			
Segmento	Coord. X (m)		Fisuras Teñidas
	Inicial	Final	
1	0,00	0,22	Ninguna
2	0,23	0,59	Algunas
3	0,60	0,66	Algunas
4	0,67	0,88	Ninguna
5	0,89	1,10	Ninguna
6	1,11	1,31	Ninguna
7	1,32	1,53	Ninguna
8	1,54	1,75	Ninguna
9	1,76	1,97	Pocas
10	1,98	2,19	Pocas

TESTIGO B4R			
Segmento	Coord. X (m)		Fisuras Teñidas
	Inicial	Final	
1	0,00	0,24	Ninguna
2	0,25	0,47	Algunas
3	0,48	0,71	Pocas
4	0,72	0,94	Ninguna
5	0,95	1,18	Ninguna
6	1,19	1,41	Ninguna
7	1,42	1,65	Ninguna
8	1,54	1,75	Ninguna
9	1,76	1,97	Ninguna
10	1,98	2,35	Pocas

TESTIGO B5D			
Segmento	Coord. X (m)		Fisuras Teñidas
	Inicial	Final	
1	0,00	0,45	Ninguna
2	0,46	0,91	Ninguna
3	0,92	1,36	Ninguna
4	1,37	1,81	Ninguna
5	1,82	2,27	Ninguna
6	2,28	2,72	Ninguna
7	2,73	3,17	Ninguna
8	3,18	3,62	Pocas
9	3,63	4,08	Ninguna
10	4,09	4,53	Pocas

TESTIGO B4A			
Segmento	Coord. X (m)		Fisuras Teñidas
	Inicial	Final	
1	0,00	0,29	Ninguna
2	0,30	0,58	Algunas
3	0,59	0,87	Ninguna
4	0,88	1,16	Ninguna
5	1,17	1,45	Ninguna
6	1,46	1,74	Pocas
7	1,75	2,03	Pocas
8	2,04	2,32	Algunas
9	2,33	2,61	Pocas
10	2,62	2,90	Ninguna

Tabla 4.12.- Datos obtenidos de la tinción del potasio

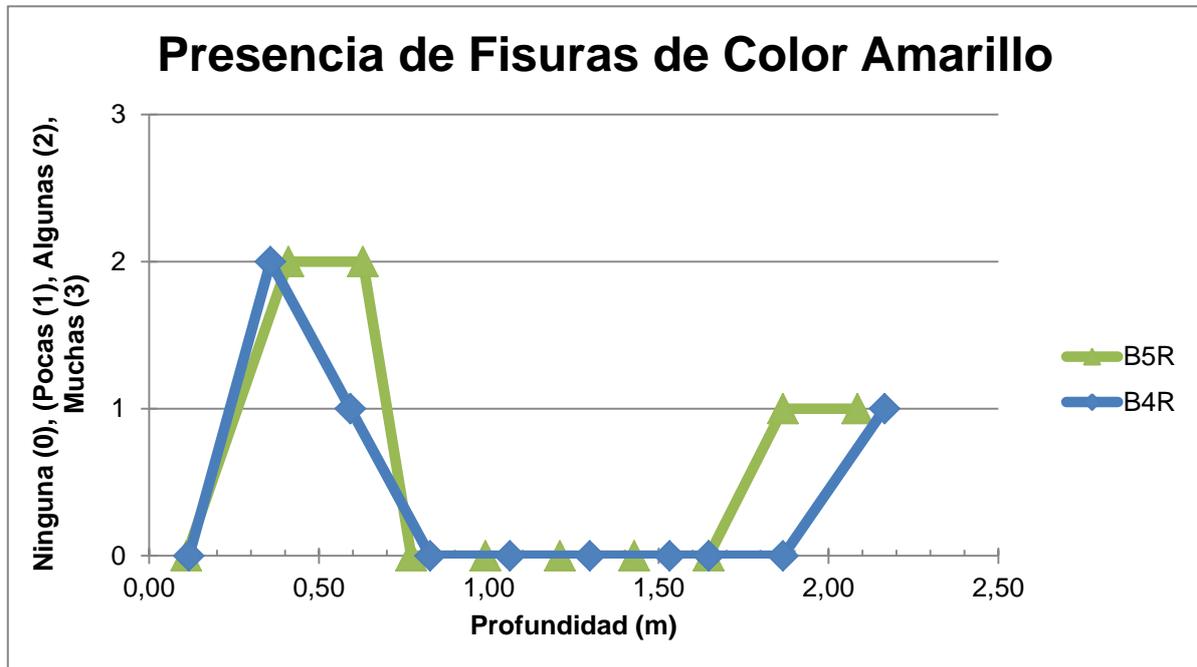


Figura 4.11.- Gráfica de la cantidad de fisuras de color amarillo presentes en las muestras de los testigos de paramento de ambos bloques.

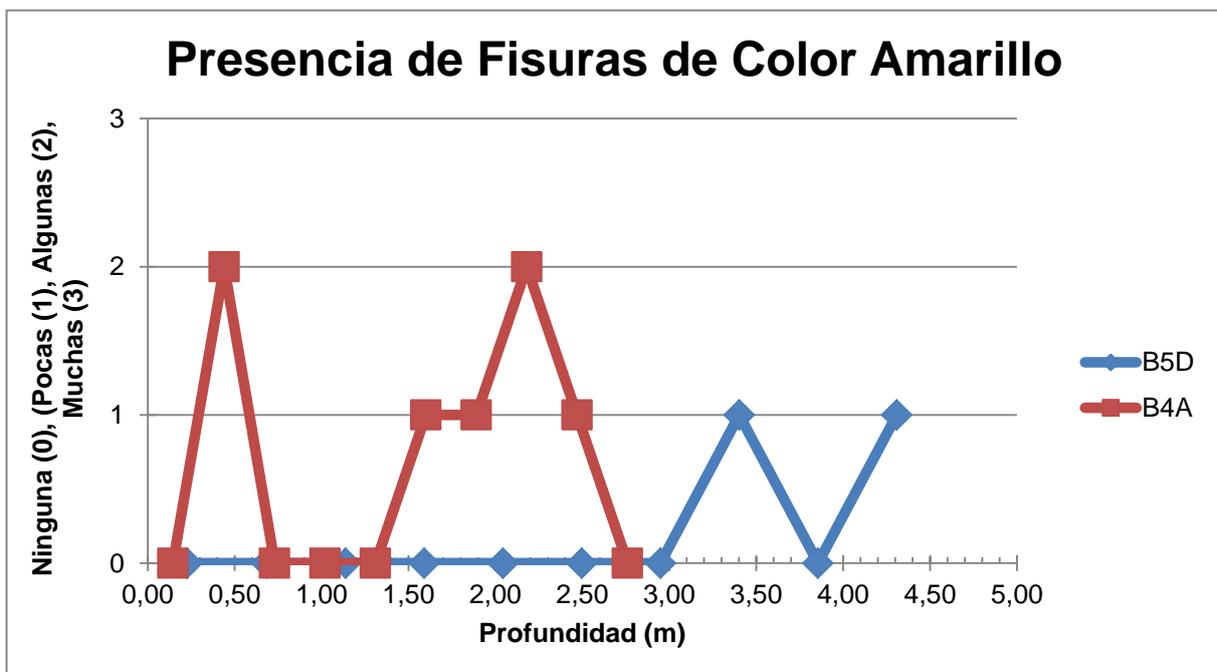


Figura 4.12.- Gráfica de la cantidad de fisuras de color amarillo presentes en las muestras de los testigos de galería de ambos bloques.

En los testigos de paramento (B5R y B4R), existen muchos segmentos que presentan pocas y algunas fisuras. Observando la gráfica, la parte inicial y final de los testigos son las que tienen más fisuras de color amarillo. Por otro lado, la parte media de estos testigos permanecen sin presencia de fisuras amarillas.

En los testigos de galería ascendente y descendente (B5D y B4A), se observa que hay mucha variación en cuanto a la presencia de estas fisuras. Las fisuras de color amarillo se observan en más cantidad y dispersas en el testigo B4A. Por otro lado, el testigo B5D no muestra ninguna fisura coloreada en los primeros 7 segmentos, y luego en los segmentos finales empiezan a aparecer.

En general, los testigos de paramento son los más afectados por fisuraciones en general, pero sin embargo la gran mayoría de estas fisuras no fueron teñidas de color amarillo, indicando que no hay presencia de potasio como precipitado. También cabe destacar, que los testigos de galería no presentaban mucha cantidad de fisuras, por lo que la tinción de potasio no pudo teñir las áreas afectadas.

4.4.- Resultados de los ensayos

4.4.1.- Ensayo de densidad y porosidad

Para este ensayos se eligieron 3 muestras de cada testigo, una de cada extremo y otra del centro. Las secciones ensayadas tenían longitudes de 5 cm y 9 cm dependiendo del patrón de corte utilizado en cada testigo. En la *Tabla 4.13* se presentan los datos del ensayo de densidad y porosidad de las muestras seleccionadas. En las *Figuras 4.13 y 3.14*, se muestran las gráficas de la porosidad de las muestras con relación a la profundidad media.

Muestras	Prof. Media (m)	Peso Sat. Sup. Seca (g)	Peso Hidrostático (g)	Peso Seco (g)	Volumen probeta (ml)	Volumen de vacíos (ml)	Densidad (g/ml)	Porosidad (%)
B5L-P2S4	0,263	1051,1	618,5	997,7	432,6	53,4	2,31	12,34%
B5L-P3S2	1,215	1282,8	756,9	1219,4	525,9	63,4	2,32	12,06%
B5L-P9S2	1,795	1248,4	730,3	1180,2	518,1	68,2	2,28	13,16%
B4L-P1S6	0,235	1239,5	741,7	1188,6	497,8	50,9	2,39	10,22%
B4L-P3S8	1,475	1287,5	769,3	1235,1	518,2	52,4	2,38	10,11%
B4L-P8S5	2,595	1266,5	753,2	1209,9	513,3	56,6	2,36	11,03%
B5R-P1S5	0,165	680,5	400,9	643,1	279,6	37,4	2,30	13,38%
B5R-P4S7	1,210	669,3	388,7	627,7	280,6	41,6	2,24	14,83%
B5R-P8S3	1,955	692,6	402,5	647,8	290,1	44,8	2,23	15,44%
B4R-P2S2	0,235	673,2	393,9	632,5	279,3	40,7	2,26	14,57%
B4R-P6S5	1,115	675,3	393,7	632,5	281,6	42,8	2,25	15,20%
B4R-P10S3	2,160	664,5	385,6	621,8	278,9	42,7	2,23	15,31%
B5A-P1S6	0,155	701,3	411,8	657	289,5	44,3	2,27	15,30%
B5A-P5S4	1,320	681,3	403,6	642,9	277,7	38,4	2,32	13,83%
B5A-P9S2	2,265	722,2	425,4	683,8	296,8	38,4	2,30	12,94%
B5D-P2S3	0,270	1256,2	747,9	1202,8	508,3	53,4	2,37	10,51%
B5D-P8S4	2,580	1241,1	732,6	1176,8	508,5	64,3	2,31	12,65%
B5D-P15S5	4,265	1266,6	756,3	1212,5	510,3	54,1	2,38	10,60%
B4A-P1S7	0,235	1223,7	715	1147,8	508,7	75,9	2,26	14,92%
B4A-P8S4	1,680	1253,7	744,5	1180,9	509,2	72,8	2,32	14,30%
B4A-P13S4	2,645	1220,2	713,1	1144,2	507,1	76	2,26	14,99%
B4D-P2S3	0,245	646,9	383,3	612,8	263,6	34,1	2,32	12,94%
B4D-P12S11	2,585	675,3	402,2	642,7	273,1	32,6	2,35	11,94%
B4D-P22S5	4,865	678,8	401,9	641,7	276,9	37,1	2,32	13,40%

Tabla 4.13.- Datos y resultados de los ensayos de densidad y porosidad.

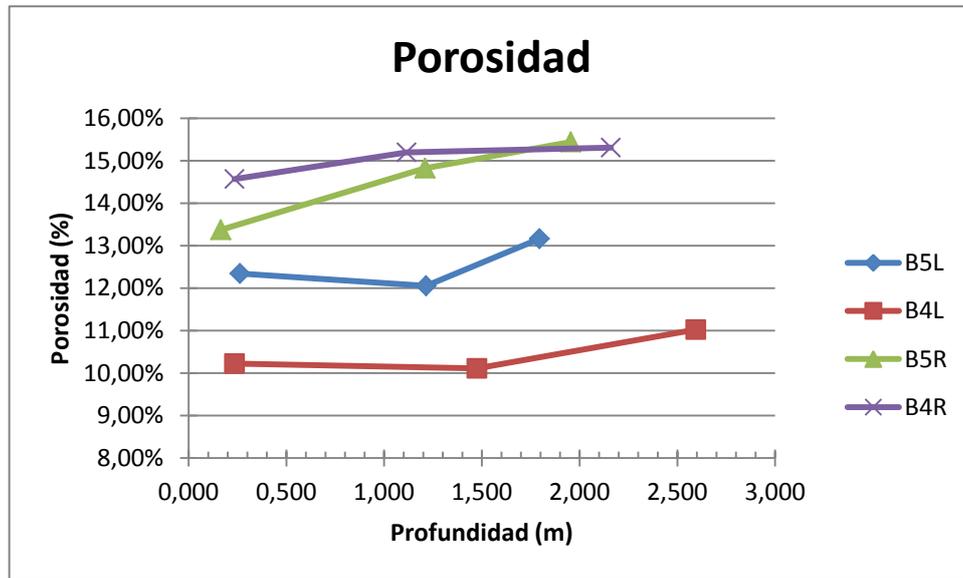


Figura 4.13.- Gráfica del ensayo de porosidad de los testigos de Paramento.

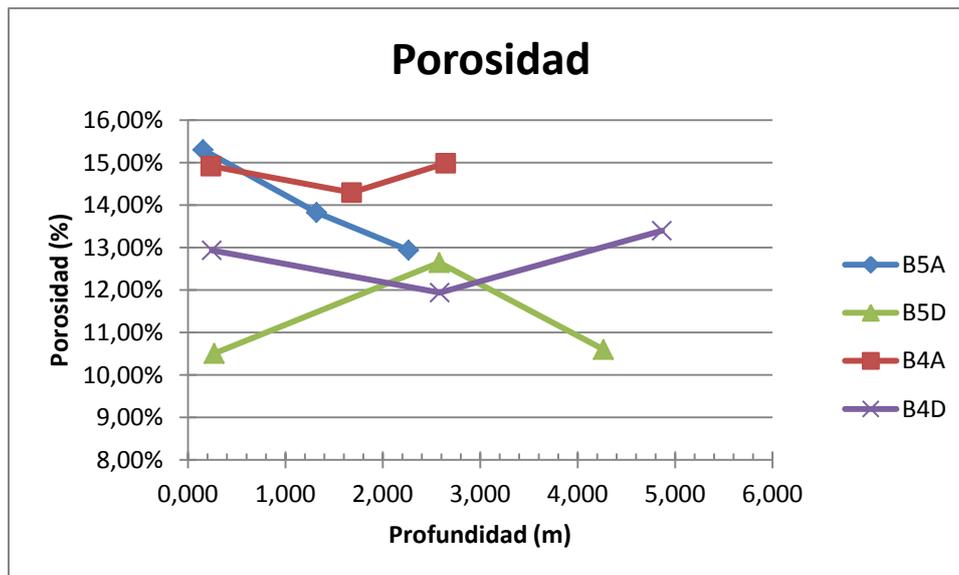


Figura 4.14.- Gráfica del ensayo de porosidad de los testigos de Galería.

En los testigos de paramento (B5L, B4L, B5R Y B4R), los resultados reflejan una tendencia a aumentar con la profundidad. Estos valores de porosidad varían entre 10,11% y 15,44%. Cabe destacar que las muestras utilizadas en los testigos derechos (R) son de diferentes dimensiones a los izquierdos (L), y por esto los resultados pueden tener algún tipo de variación debido a las superficies expuestas.

En los testigos de galería ascendentes (B5A y B4A), los resultados empiezan prácticamente en el mismo valor (14,92% \approx 15,30%), pero difieren a medida que profundizan, presentando una disminución el testigo B5A, y una no variación del testigo B4A.

En los testigos de galería descendentes (B5D y B4D), los resultados obtenidos son completamente distintos. El testigo B5D presenta una porosidad inicial mucho menor que el testigo B4D (10,51% con relación a 12,94%). Por otro lado, los valores de ambos testigos tienen una línea de tendencia a permanecer horizontalmente.

En general, los valores de porosidad de todos los testigos son muy elevados, siendo 15,44% el valor máximo y 10,11% el valor mínimo de todas las muestras analizadas inclusive para hormigones de presas. Por otro lado, analizando los valores de densidad, se puede observar que las variaciones son poco significativas.

4.4.2.- Ensayo de permeabilidad al O₂

Para estos ensayos se eligieron 12 muestras de 4 testigos que presentaban patrón de corte 2–2–5 cm. Se obtuvieron 3 muestras en cada uno, una de cada extremo y otra del centro, para un total de 12 muestras. Las secciones ensayadas tenían longitudes de 5 cm. En la *Tabla 4.14* se presentan los datos del ensayo de densidad y porosidad de las muestras seleccionadas.

Muestras	Coficiente de permeabilidad al oxígeno ($k \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$)
B5R-P1S2	411.48
B5R-P4S4	69.30
B5R-P8S6	119.53/109.97
B4R-P1S4	336.68
B4R-P6S8	28.7
B4R-P10S6	35.18
B5A-P1S3	0.05
B5A-P4S7	0.08
B5A-P9S5	0.21
B4D-P1S4	0.20
B4D-P12S8	0.10
B4D-P22S8	0.04

Tabla 4.14.- Resultados del ensayo de permeabilidad al O₂.

En los testigos de paramento (B5R Y B4R), los resultados reflejan una tendencia general a disminuir de manera brusca el coeficiente de permeabilidad al oxígeno, reflejando una muy alta permeabilidad en la zona exterior de los testigos de paramento, indicando daños en el material debido a alguna acción expansiva.

En los testigos de galería ascendente y descendente (B5A y B4D), existen valores del coeficiente de permeabilidad muchísimo menores que los resultados obtenidos en los testigos de paramento. Sin embargo, estos testigos de galería, difieren totalmente con relación a los valores iniciales y finales. El testigo ascendente (A) aumenta su coeficiente de permeabilidad a medida que se profundiza. Y en contraste, el testigo descendente (D), disminuye su coeficiente a lo largo de la profundidad. Cabe destacar, que ambos testigos tienen valores iniciales distintos (0,05 y 0,20, respectivamente).

En general, los valores varían de manera muy significativa entre testigos de paramento y de galería, indicando que ambos están en condiciones y efectos totalmente distintos.

4.4.3.- Ensayos de ultrasonido

Se seleccionaron 12 muestras de 4 de los testigos con patrón de corte de 2-2-9 cm. Se obtuvieron 3 muestras en cada uno, una de cada extremo y otra del centro. Los datos de los ensayos realizados fueron los siguientes:

Dimensiones:

- Diámetro: 86.5 mm
- Altura: Variable entre 74 y 88 mm

Inspección:

- Tipo: Diametral y axial en transmisión con inmersión en agua
- Transductores: Ondas longitudinales
- Frecuencia 500 Khz,
- Modelo: Olympus V413
- Rejilla de inspección diametral: Altura 2 mm, Ángular: 3°
- Rejilla de inspección axial: 2 x 2 mm.
- Parámetros ultrasónicos: Amplitud y velocidad

Instrumentación:

- Diametral: Sistema de inspección diametral IMAUSHOR

- Emisor: AIMS, Receptor: Panametric 5662, digitalizador: HS3 (10 Mm/s, 12 bit)

Axial:

- Sistema de inspección cartesiano 2 ejes
- Emisor/receptor AIMS, digitalizador: SENDAS (10Mm/s, 8 bit)

4.4.3.1.- Mapas de amplitud:

Los mapas de amplitud diametral se miden en decibeles (dB), estos se presentan en la *Figura 4.15*:

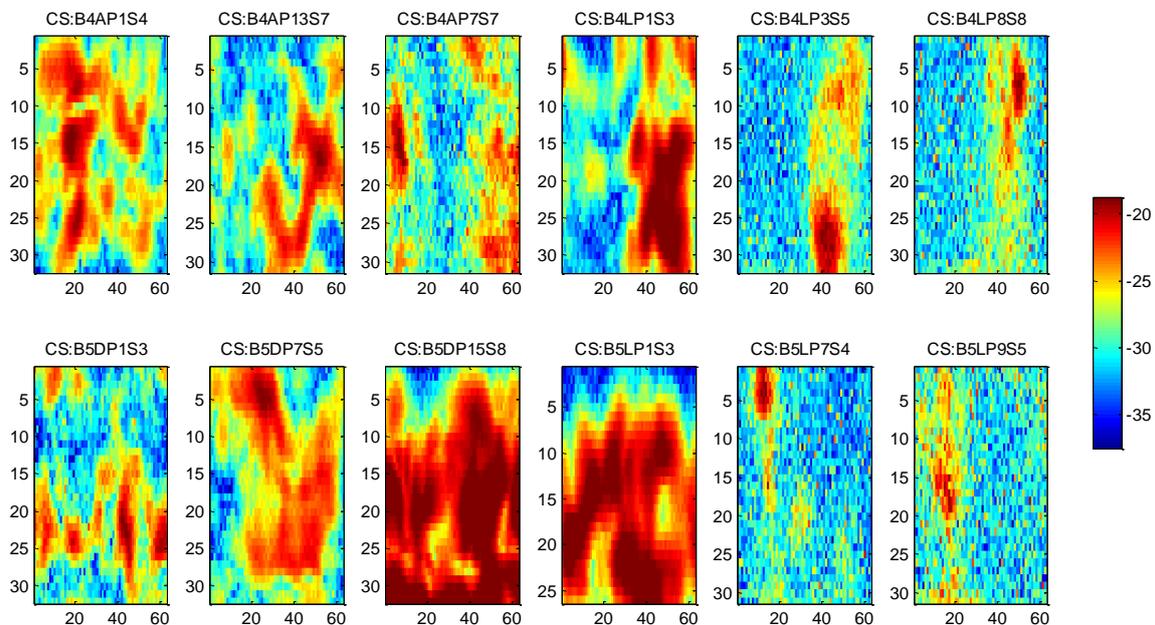


Figura 4.15.- Mapa de amplitud diametral.

Los mapas de amplitud axial se miden también en decibeles (dB), estos se presentan en la *Figura 4.16*:

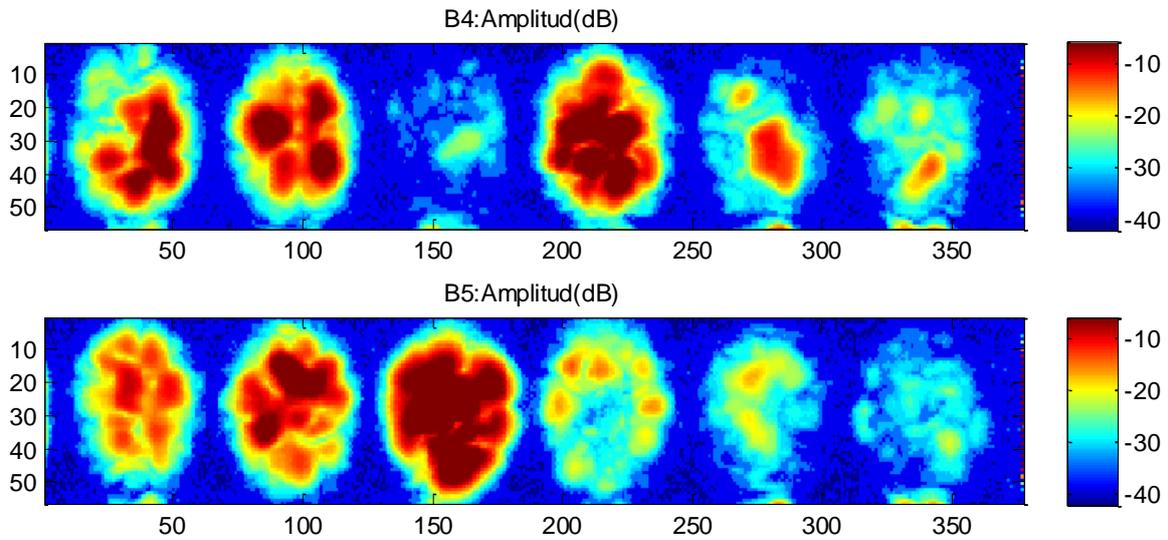


Figura 4.16.- Mapa de amplitud axial.

4.4.3.2.- Mapas de velocidad:

Los mapas de velocidad diametral se presentan en la *Figura 4.17:*

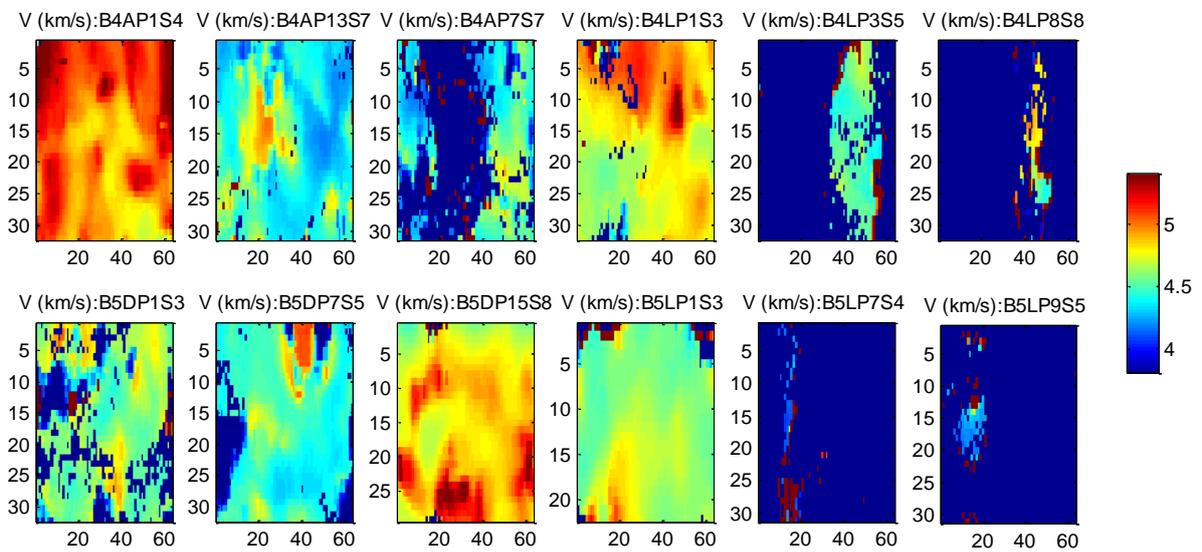


Figura 4.17.- Mapa de velocidad diametral.

Los mapas de velocidad axial se presentan en la *Figura 4.18:*

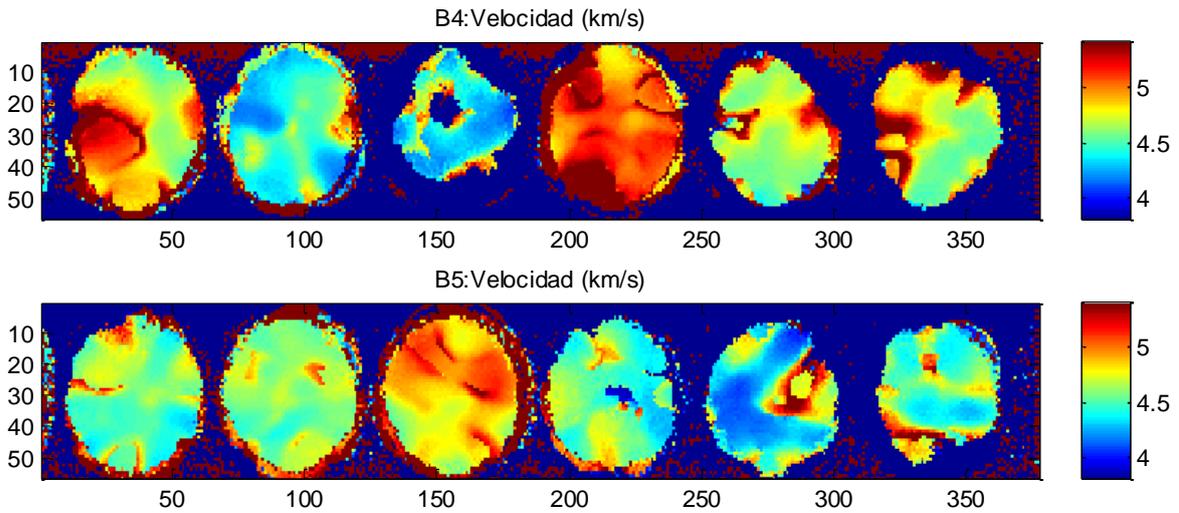


Figura 4.18.- Mapa de velocidad axial.

4.4.3.3.- Mapas de alturas axiales:

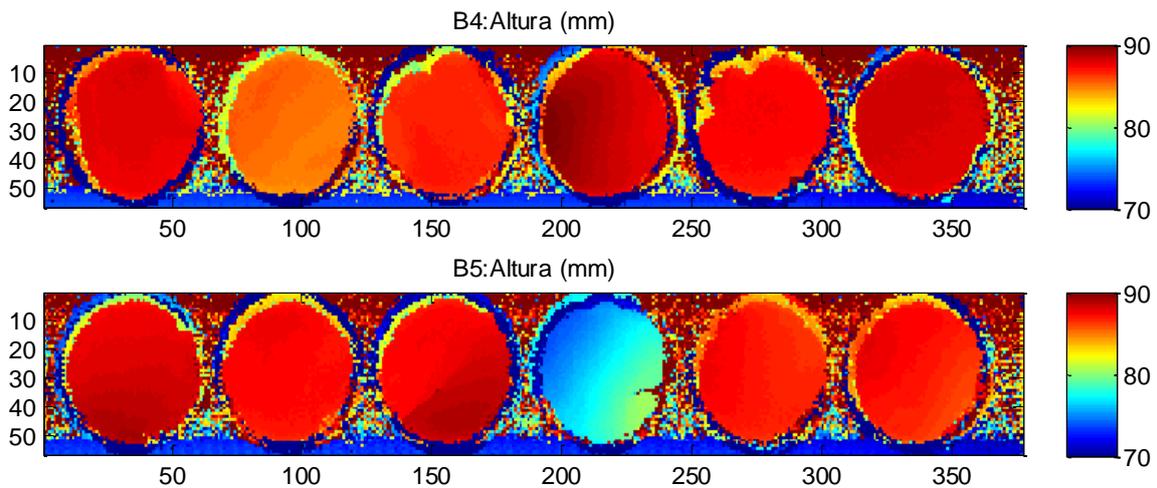


Figura 4.19.- Mapas de alturas axiales.

4.4.3.4.- Análisis:

En término general la amplitud nos va a indicar la existencia de coqueras o la aparición de microfisuras. La velocidad nos puede indicar el mismo fenómeno pero modulado por el tipo de material, en general un aumento de la velocidad nos indica que el material está sano o que tiene una concentración alta de agregados. Por tanto podemos definir cuatro estados:

1. Baja amplitud y baja velocidad: testigo dañado.
2. Baja amplitud y buena velocidad: testigo con coqueras o agrietado pero con un nivel alto de agregados.
3. Buena amplitud y baja velocidad: el testigo tiene pocos agregados o son pequeños, pero está sin daños.
4. Buena amplitud y velocidad: testigo sin daños.

Las imágenes diametrales y axiales nos van a mostrar las diferentes zonas del testigo con daños o discontinuidades, ya sean coqueras o grietas o microgrietas. Siempre hay que tener en cuenta que una zona muy dañada o con coqueras impide la transmisión de los ultrasonidos en esa dirección, por lo que si no existe transmisión diametral, y sí transmisión axial, los daños estarán en la superficie externa curva del testigo, en caso contrario los daños, grietas o coqueras estarán en un plano o zona paralela a las caras planas del testigo.

Para cuantificar los daños, se puede establecer un parámetro D del testigo, que es el porcentaje del testigo donde la señal ultrasónica transmitida en el sentido diametral no alcanza una energía determinada. Va a depender del tipo de material y en este caso el umbral se ha fijado en -25 dB. También se puede calcular la velocidad media en el sentido diametral (V_m) de la zona donde el pulso ultrasónico se ha transmitido para corroborar el anterior parámetro. Se pueden utilizar parámetros similares para la inspección axial pero en general es una información redundante y en casos donde las bases no son paralelas puede llevar a equívocos.

Según este criterio, las muestras las podemos clasificar en 2 grupos de acuerdo al lugar de extracción:

Testigos de paramento (B5L y B4L):

Bloque 5 izquierdo

- B5LP1S3: No aparecen daños en el sentido diametral. La falta de señal y velocidad en el sentido axial puede ser debida a la falta de paralelismo en las caras como se puede ver en la imagen de altura. $D=0\%$, $V_m= 4634$ m/s.
- B5LP7S4: Testigo muy dañado. $D=85\%$, $V_m= 4225$ m/s.
- B5LP9S5: Testigo muy dañado. $D=90\%$, $V_m= 4305$ m/s.

Bloque 4 izquierdo

- B4LP1S3: Testigo sin daños. $D=4\%$, $V_m=4816$ m/s.
- B4LP3S5: Testigo muy dañado. $D=67\%$, $V_m= 4546$ m/s.
- B4LP8S8: Testigo muy dañado. $D=84\%$, $V_m=4640$ m/s.

Testigos de galería: (B4A y B5D)

Bloque 4 ascendente

- B4AP1S4: Testigo sin daños. $D=0\%$, $V_m=5032$ m/s.
- B4AP7S7: Testigo dañado. $D=39\%$, $V_m= 4416$ m/s.
- B4AP13S7: Testigo sin daños internos, pero con coqueas o microgrietas superficiales. $D=2\%$, $V_m= 4457$ m/s.

Testigos de galería descendente:

- B5DP1S3 : Testigo con daños incipientes, pocos agregados. $D=18\%$, $V_m= 4573$ m/s.
- B5DP7S5: Testigo sin daños, pocos agregados. $D=5\%$, $V_m= 4482$ m/s.
- B5DP15S8: Testigo sin daños. $D=0\%$, $V_m= 4877$ m/s.

En *general*, se puede observar que los testigos de paramento son los que más daños presentan. Si analizamos la variación de los resultados de estos testigos, se puede apreciar un aumento del parámetro D , indicando que un gran porcentaje de las muestras presentan discontinuidades debido a fisuramientos. Por otro lado, los testigos de galería no presentan casi daños en las muestras.

CAPÍTULO 5

PROPUESTA

METODOLÓGICA

5.1.- Introducción

En este capítulo, se definirá una propuesta metodológica para la caracterización de testigos en presas con problemas expansivos, basándonos en la metodología utilizada en el *capítulo 3*. Luego de analizar todos los datos, se pudo evaluar de forma crítica la metodología empleada, y así después hacer ciertos ajustes para mejorarla. Estos ajustes dieron forma a lo que presentamos en este *capítulo 5*, de manera que los futuros estudios puedan regirse por la propuesta que se detallará a continuación.

Al igual que en el *capítulo 3*, la propuesta metodológica consta de dos fases, como se puede ver en la *Figura 5.1*. La primera fase abarca la metodología de caracterización de testigos, y la segunda fase se abarca una metodología de análisis basada en los datos obtenidos. Sin embargo, en este capítulo sólo se detallará la fase metodológica de caracterización, porque la segunda fase se implementará de la misma forma en que está presentado en el *capítulo 2, sección 3.4*.

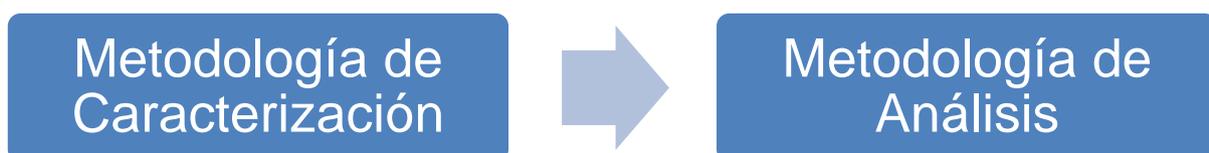


Figura 5.1.- Pasos de la metodología general de caracterización de testigos

5.2.- Objetivos

Los objetivos de este capítulo son básicamente definir una propuesta metodológica para poder emplearla en la caracterización de testigos de presas con problemas expansivos a nivel general.

5.3.- Propuesta metodológica

La metodología general para la caracterización de los testigos con problemas expansivos, se presenta en forma de síntesis en la *Figura 5.2*:

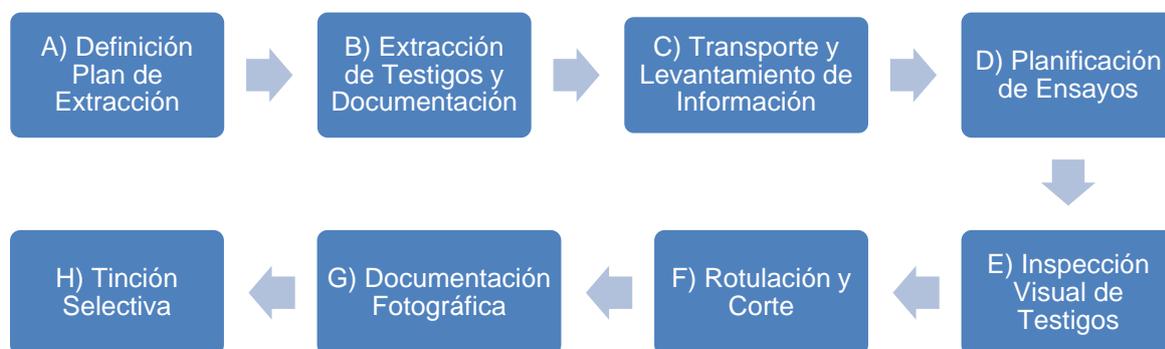


Figura 5.2.- Pasos de la metodología general de caracterización de testigos

5.3.1.- Definición del plan de extracción de testigos:

Mediante una visita a la obra, primero se realiza una inspección visual de la presa, y se detectan las áreas más afectadas por el fenómeno expansivo. Luego, en los planos de la presa, se deben localizar los bloques de hormigonado que presentan las patologías pertenecientes a las áreas más afectadas.

Después, de manera empírica, se deciden la cantidad de muestras (testigos) a extraer en cada bloque, dependiendo del nivel de exactitud del estudio deseado, preferiblemente 4 testigos por cada bloque de hormigonado (2 en zonas de paramento y 2 en zonas de galerías interiores). Además, se tiene que definir el diámetro y la longitud de extracción de los testigos. Se recomienda revisar los planos de construcción para detectar posibles conflictos con drenajes, cableado de instrumentaciones, y cualquier otro tipo de instalaciones.

El siguiente paso consiste en ubicar en planos de la presa cada testigo a extraer, detallando la orientación de la perforación y su identificador. Se recomienda adjuntar planos con detalles en planta, alzado y sección de estas ubicaciones.

5.3.2.- Extracción de testigos y documentación:

Lo siguiente es la realización de la extracción de los testigos, documentando todo el proceso de extracción, y luego proceder a empacarlos. El empaque de los testigos se debe realizar sellándolos con tapas en tubos de PVC, con diámetro ligeramente mayor que los testigos extraídos, y resistentes a los procesos de transporte y almacenamiento. Las cajas contenedoras (tubos de PVC), deben de tener 50% de su volumen llenas de agua, y preferiblemente ser envueltas en plástico con burbujas de aire para brindarles mayor protección. Por último, cada caja debe poseer una etiqueta a prueba de agua y rasguños con la siguiente información:

- Nombre de la presa
- Referencia de la localización de extracción.
- Fecha de extracción
- Número segmentos o piezas en la caja.
- Sentido de la perforación
- Profundidad inicial y final de las muestras en cada caja.
- Número de la caja y el número total de cajas.
- Nombre de la compañía que realizó la extracción.

Se recomienda adjuntar una bitácora con las observaciones apuntadas en el momento de la extracción de cada testigo.

5.3.3.- Transporte y levantamiento de información:

Preparar el conjunto de cajas contenedoras en una base que permita levantarlas sin causar daños en las mismas. Calzar y amarrar todas las cajas entre sí aporta resistencia al conjunto, dándoles mayor capacidad de absorber esfuerzos. Luego de la preparación, se deben transportar al lugar donde se les realizará la caracterización.

Luego que las muestras lleguen a su lugar de destino, el equipo de caracterización debe de realizar un levantamiento de toda la información existente con relación a la extracción de los testigos, en una tabla. Ésta debe incluir la identificación y las condiciones en que están todas las cajas contenedoras de los testigos, así como los datos que aparecen en las etiquetas

5.3.4.- Planificación de ensayos:

En este paso, se planifican los patrones de corte a implementar en el seccionamiento de cada pareja de testigos (A y B), y también los ensayos que se les realizarán a los mismos como parte del proceso de caracterización.

- Patrón de los cortes a utilizar :
 - A. 2 cm – 2 cm – 9 cm
 - B. 2 cm – 2 cm – 5 cm

- Ensayos:
 - Porosidad y densidad en muestras de 5 y 9 cm:

Seleccionar 3 muestras pertenecientes a la sección inicial, media y final de cada testigo.

 - Ultrasonido en muestras de 9 cm:

Seleccionar 3 muestras pertenecientes a la sección inicial, media y final de cada testigo A.

 - Permeabilidad al O₂ en muestras de 5 cm:

Seleccionar 3 muestras pertenecientes a la sección inicial, media y final de cada testigo A.

- Tinciones a realizar en las secciones de 2 cm:
 - Sulfatos: Seleccionar muestras alternas de 2 cm en testigos A.
 - pH: Seleccionar muestras alternas de 2 cm en testigos B.
 - Calcio: Seleccionar las muestras faltantes alternas de 2 cm en testigos A.
 - Potasio: Seleccionar las muestras faltantes alternas de 2 cm en testigos B.

Por último, se prepararán los materiales que se usarán y las áreas de trabajo. Los materiales y herramientas a usar se detallan anteriormente en la *sección 3.3.4*.

5.3.5.- Inspección visual:

En este paso se sacan individualmente cada testigo, considerando que estos se deterioran al ser expuestos. Luego se procede a elaborar una descripción de las condiciones físicas en que se encuentran, enumerando cada pieza.

5.3.6.- Rotulación y Corte:

Realizar el ensamblado de las piezas o segmentos que componen el testigo a caracterizar encima de una mesa de trabajo. En la *Figura 3.6* se presenta un ejemplo del ensamblado del testigo sobre la mesa de trabajo.

Luego, indica la primera sección a ser cortada en cada pieza y se toma la medida acumulada con flexómetro de los valores iniciales, finales y del primer corte en cada pieza.

Lo siguiente es realizar un fotografiado general, un fotografiado detallado de cada pieza, una descripción y un análisis preliminar de las características observadas en cada segmento. Las características a observar son: condición física de las muestras, humedad, material suelto, precipitados, suciedad, fisuras en la pasta, fisuras en los áridos, decoloración, tipo de áridos y tamaño de los áridos.

Después se procede a marcar y numerar con rotulador permanente todas las secciones de cada pieza a ser cortada. Cada pieza se rotula individualmente, tomando criterios para obtener la mayor cantidad de muestras en los cortes como haya sido planificado para los ensayos. Se deben realizar las rotulaciones con la siguiente nomenclatura:

Bwx – PySz

- w: Hace referencia al número del bloque de hormigonado perforado de la presa.
- x: Hace referencia a la posición u orientación dentro del bloque (L, R, A, D). (L) "Left", izquierda; (R) "Right", derecha; (A) "Ascendent", ascendente; y (D) "Descendent", descendente.
- y: Hace referencia al número de la pieza del testigo sacado de su contenedor, tomando en consideración la dirección de la perforación para la extracción del testigo.
- z: Hace referencia al número de la sección de corte referente a cada pieza, siempre en orden ascendente en dirección de la perforación.

El siguiente paso consiste en documentar todas las piezas enumeradas y su ubicación con respecto a las medidas tomadas anteriormente. Y por último, se cortan los testigos y luego se limpian las muestras de cualquier residuo dejado.

5.3.7.- Documentación fotográfica:

En este paso, se realiza una documentación fotográfica de todas las caras de los cortes de las secciones, utilizando la iluminación, la base de fondo, y la referencia dimensional especificada en la *sección 3.3.4*. Para este procedimiento, se recomienda una cámara con un lente fijo, y opciones para modificar manualmente los parámetros de exposición, abertura, y velocidad, de manera que todas las fotografías posean las mismas características.

Después de haber realizado la documentación fotográfica de todas las muestras, se procede a seleccionar las muestras destinadas a realizarles los distintos ensayos.

5.3.8.- Tinción selectiva:

La metodología para la tinción selectiva de las muestras de los testigos, se detalla en la *sección 3.3.8.1*.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1.- Introducción

En esta tesina se han ido desarrollando los distintos capítulos de una forma lógica para el lector, de manera que el *capítulo 1* abarca lo referente a la introducción del tema y una visión que pasa desde un punto de vista global, a una perspectiva específica con relación a nuestro caso de estudio. Luego, en el *capítulo 2*, se definieron y se describieron lo que son las reacciones expansivas con relación a los efectos nocivos que atacan la presa de estudio seleccionada en nuestro caso.

En el *capítulo 3* de este trabajo, se adoptó y se detalló una metodología para emplearla en la caracterización de los testigos. Esta metodología fue redactada en base a conocimientos y recomendaciones de experiencias previas en presas.

Por último, en el *capítulo 4* se analizaron los datos obtenidos y luego en el *capítulo 5*, se elaboró la propuesta metodológica para la caracterización de testigos de presas con problemas expansivos.

A continuación se pretende presentar las conclusiones generales y específicas derivadas del presente estudio.

6.2.- Conclusión general

- Los ensayos han permitido identificar la pre-existencia de las reacciones RSI y RSA, y también la tendencia en que ocurren en la misma estructura, con intensidades distintas en función de la zona afectada.
- Se ha logrado plantear una propuesta metodológica para la caracterización de testigos de presas con problemas expansivos.

6.3.- Conclusiones específicas

6.3.1.- Conclusiones específicas del diagnóstico

- Todos los testigos presentan tamaños variados de los áridos y las formas de éstos son totalmente irregulares. En cuanto a la forma, se puede apreciar que el bloque 4 tiene áridos de menor tamaño en comparación al bloque 5.
- El color de los áridos en general varía entre un gris claro y un gris oscuro, presentando manchas de óxidos dentro de los áridos en casi todos los segmentos, indicando vetas de metales oxidados en los propios áridos.
- Los testigos de paramento y los testigos de galería descendentes de ambos bloques son los que más presencia de coqueras presentan. Los testigos de paramento poseen coqueras llenas de gel blanco, la mayoría de las cuales en los segmentos iniciales y finales.
- La mayoría de los segmentos de los testigos extraídos de galería poseen coqueras llenas de gel blanco, y muchos de los segmentos pertenecientes a los de galería del bloque 4, tienen coqueras en la interfaz árido-pasta, llenas también de gel blanco, indicando una posible reacción álcali-árido.
- Mayormente todos los segmentos analizados presentaron una buena agregación. Los únicos segmentos que tuvieron una discordancia con esta buena agregación entre la pasta y los áridos, pertenecen a los testigos descendentes de galería.
- Los testigos de paramento son los más afectados por fisuraciones, en especial el bloque 4, que es el que más cantidad de fisuras posee por muestra. Los testigos de galería no presentan casi fisuras, y los que sí poseen, por lo general no se extienden en la pasta; pero en algunas de las fisuras que presentan, se pueden observar un precipitado de color blanco, indicando una posible reacción álcali-sílice.
- La mayoría de las muestras analizadas tienen presencia de sulfatos. En los testigos de paramento se disminuye la presencia de sulfatos en los segmentos más profundos. Este comportamiento de disminución de sulfatos, a medida que se profundiza en la estructura del paramento, es propio de las reacciones sulfáticas internas.
- La presencia de halos de decoloración de la tinción de pH, debido a la acidificación de reacción sulfática interna, ocurre en los testigos de paramento de ambos bloques.
- La presencia de halos de coloración más intensa de la tinción de calcio, debido a la reacción álcali-sílice, se observa sólo en uno de los testigos de galería.

- Los testigos de paramento son los más afectados por fisuraciones en general, pero sin embargo la gran mayoría de estas fisuras no han sido teñidas con tinción de potasio, indicando que posiblemente no hay presencia de reacciones álcali-sílice.
- Los valores de porosidad de todos los testigos son muy elevados, siendo 15,44% el valor máximo y 10,11% el valor mínimo de todas las muestras analizadas. Por otro lado, analizando los valores de densidad, se puede observar que las variaciones son poco significativas.
- Los valores del coeficiente de permeabilidad al O₂ varían de manera muy significativa entre testigos de paramento y de galería, indicando una mayor presencia de fisuración en los testigos de paramento.
- Los testigos de paramento son los que más daños presentan. Si analizamos la variación de los resultados de estos testigos, se puede apreciar un aumento del parámetro D en los ensayos de ultrasonido, indicando que un gran porcentaje de las muestras presentan discontinuidades debido a fisuras. Por otro lado, los testigos de galería no presentan casi daños en las muestras.

6.3.1.- Conclusiones de propuesta de Metodología:

Luego de los estudios realizados y la propuesta presentada de metodología se concluye que la misma es primordial para un diagnóstico preciso de las causas de los procesos expansivos, y puede llevar a una previsión de su evolución en el tiempo, conduciendo a tratamientos y reparaciones más efectivas, reducción de los costes de mantenimiento y mayor seguridad estructural en la presas que dan servicio a nuestra sociedad.

6.4.- Líneas de investigación futuras

Aunque el trabajo se ha realizado de la manera más eficiente posible, debido a la disponibilidad limitada de recursos y tiempo, existen líneas de investigación en que hay que profundizar. Algunas de estas líneas de investigación se detallan a continuación:

- Realización de ensayos químicos y análisis de imagen, que sirvan para la corroboración de la tendencia de los resultados obtenidos en el diagnóstico de la presa de Gras. Algunos de los ensayos recomendados son: difracción por rayos X (DRX), fluorescencia por rayos X (FRX), análisis térmico diferencial (TDA) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

- Comprobación de la metodología propuesta en otros casos de estudio, implementándola y analizado los nuevos resultados obtenidos para seguir mejorándola y detallándola aún más.
- Identificar y probar nuevas metodologías de tinción que permitan acotar efectivamente las reacciones expansivas, o incluso, diferentes mecanismos de degradación presentes en otras estructuras de presas, tales como reacciones sulfáticas externas y reacciones álcali-carbonatos.

REFERENCIAS

- Aguado, A., Agulló, L., Bastus, E., Chinchón, S., & Vázquez, E. (Julio de 1993). Estudio del Comportamiento de las Presas de Graus y Tabescan. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Aguado, A., Agulló, L., Casanova, I., & 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.
- Alaejos, M. y. (2003). Durabilidad y Procesos de Degradación del Hormigón de presas. (M76). Monografías CEDEX.
- Alaejos, M., & Bermúdez, M. (2003). *Durabilidad y Procesos de Degradación del*. Monografías CEDEX.
- American Society of Testing and Materials, A. (2005). C294-05.
- Araújo, G. S. (2008). La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Ayora, C., Chinchón, S., Aguado, A., & Guirado, F. (1998). Weathering of iron sulfides an concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain. *Cement and Concrete Research*, 28, 1223-1235.
- Barnett, S. J., Macphee, D. E., & Crammond, N. J. (2003). Extent of immiscibility in the ettringite-thaumasite system. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 851-855.
- Buil, M. J., Río, F., Aguado, A., Agulló, L., Araujo, G., & López, M. C. (2008). Revisión del diagnóstico de la presa de Mequinenza. *GECOLD: VIII Jornadas Españolas de Presas*. Córdoba.
- Casanova, I., Agulló, L., & Aguado, A. (1996). Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model. *Cement and Concrete Research*, 26, págs. 993-998.
- Casanova, I., Agulló, L., & Aguado, A. (1997). Agregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 27, págs. 1627-1632.

- Chinchón-Paya, S., Oliveira, I., Chinchón, S., & Aguado, A. (2011). The sulfate attack by degradation of iron sulfides and the effect of the host rock. *XII International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Porto.
- Del Hoyo, R., & Casafont, L. B. (1992). Envejecimiento de presas y métodos de reparación. *Revista de obras públicas*(3309).
- Dent Glasser, L. S., & Kataoka, N. (1981). The chemistry of alkali reaction. *Cement and Concrete Research*, 11, 1-9.
- Estructural, E.-0. I. (18 de Julio de 2008). Real Decreto 1247/2008.
- Francinete Jr, P., & Figueiredo, E. J. (1999). Estudo da difusão do oxigênio no concreto. *Boletim Tecnicoda da Escola Politécnica da USP*.
- Hadley, D. W. (1964). Alkali Reactivity of Dolomitic Carbonate Rocks. *Highway Research Record*, 45, 1-20.
- Helms, S. W. (1977). *Jawa Excavations 1975: Third Preliminary Report*. Levant.
- Hobbs, D. W. (1988). *Alkali - silica reaction in concrete*. New York: American Society of Civil Engineers.
- ICOLD. (1991). Alkali-Aggregate Reaction in concrete dams: Review and Recommendations. 79.
- Lombardi, G. (2006). Monitoraggio in relazione alla manutenzione delle dighe. *ITCOLD: Giornata sul miglioramento e la riabilitazione delle dighe per preservare un importante capitale*, 20. Roma.
- Matos, D. S., Silva, H. S., Pinho, J. S., & Camelo, A. (1995). Deterioration of Pracana Dam due to ASR – Main features and repairs work. *2nd International Conference on alkali-aggregate reactions in hydroelectric plants and dams*, (págs. 693-706). Chattanooga.
- Mehta, P. K. (1986). *Concrete. Structure, propertieess and materials*. Englewwod Cliffs: NJ Prentice-Hall.
- Metha, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). Concrete Microstructure properties and materials. (3), 659. New York: McGraw-Hill.
- Nicholson, R. V., Gillham, W. R., & Reardon, J. E. (1990). Pyrite oxidation in carbonate –buffered solution: 2. *Rate Control by oxide coating Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, págs. 395 - 402.

- Oliveira, I. (Octubre de 2011). Reacción sulfática interna en presas de hormigón: cinética del comportamiento. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Page, C. L., & Lambert, P. (1987). Kinetics of oxygen diffusion in hardened cement pastes. *Journal of Materials Science*, 22, págs. 942-946.
- Pardo, F. (2009). Estudio del diagnóstico y del tratamiento de presas de hormigón con expansiones. Barcelona: Tesina final de Carrera-UPC.
- Río, F., Lopez, M. C., Araujo, G., & Aguado, A. (2008). Análisis de la fisuración orientada en coronación: interacción estribo-estructura. *GECOLD: VIII Jornadas Españolas de Presas*. Córdoba.
- Rodrigues Andriolo, F. (2007). Chemical expansion of concrete in dams & hydro-electric projects. Brazil.
- Sahu, S., Exline, D. L., & Nelson, M. P. (2002). Identification of thaumasite in concrete by Raman chemical imaging. *Cement and Concrete Composites*, 34(3-4), 347-350.
- Schmidt, T., Leemann, A., Gallucci, E., & Scrivener, K. L. (2009). *Microstructural investigation of iron sulfide degradation in concrete*. Weimar, Alemania: IBAUSIL.
- Segarra Foradada, J. (2005). Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Stanton, T. E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *American Society of Civil Engineers*, 66, 1781-1811.
- Steger, H. F., & Desjardins, L. E. (August de 1980). Oxidation of sulfide minerals; V, Galena, sphalerite and chalcocite. *Can Mineral*, 18, págs. 365-372.
- Taylor, F. W. (1997). *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford.
- Valls, S. (2011). Material de clase: Durabilidad del hormigón en base a reacciones de expansión endógenas. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Van den Berg, C., & Seddon, C. (1991). Alkali - aggregate reaction in large dams in. *17th ICOLD Congress on Large Dams*, (págs. 703-718). Viena.

ANEJOS

ANEJO 1

Documentación de la Información de todos los Testigos

Bloque	Orientación	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Long. Real (m)	Fecha Extracción	Caja	Patron de Corte	Tinciones	Fecha de Corte	Observaciones
B5	IZQUIERDA	0,00	2,50	1,93	04/08/2011	1/1	(2cm, 2cm, 9 cm)	Sulfatos, Calcio	22/02/2012	Testigo seco, tapa no sellada.
B4	IZQUIERDA	0,00	2,30	2,96	04/08/2011	1/2	(2cm, 2cm, 9 cm)	Sulfatos, Calcio	05/03/2012	Caja llena de agua y buen estado.
B4	IZQUIERDA	2,40	2,95		04/08/2011	2/2	(2cm, 2cm, 9 cm)		05/03/2012	Caja llena de agua y buen estado.
B5	DERECHA	0,00	2,50	2,19	04/08/2011	1/1	(2cm, 2cm, 5 cm)	PH, Potasio	19/03/2012	Caja llena de agua, mucho polvo.
B4	DERECHA	?	?	2,35	04/08/2011	1/1	(2cm, 2cm, 5 cm)	PH, Potasio	21/03/2011	Caja rota, material suelto, testigo húmedo, etiqueta en muy mal estado.
B5	ASCENDENTE	0,00	2,50	2,41	04/08/2011	1/1	(2cm, 2cm, 5 cm)	Sulfatos, Calcio	22/03/2011	Testigo húmedo, caja buen estado.
B5	DESCENDENTE	0,00	2,30	4,53	03/08/2011	1/2	(2cm, 2cm, 9 cm)	PH, Potasio	23/03/2011	Tapa rota, testigo poco húmedo.
B5	DESCENDENTE	2,30	4,50		03/08/2011	2/2	(2cm, 2cm, 9 cm)		28/03/2011	Caja buen estado, testigo húmedo.
B4	ASCENDENTE	0,00	2,30	2,90	04/08/2011	1/2	(2cm, 2cm, 9 cm)	PH, Potasio	28/03/2012	Caja sellada, llena de agua.
B4	ASCENDENTE	2,30	2,85		04/08/2011	2/2	(2cm, 2cm, 9 cm)		28/03/2012	Caja sellada, etiqueta muy mal estado.
B4	DESCENDENTE	0,00	2,20	5,05	03/08/2011	1/3	(2cm, 2cm, 5 cm)	Sulfatos, Calcio	14/04/2012	Caja rota en la punta, poca humedad.
B4	DESCENDENTE	2,20	2,40		03/08/2011	2/3	(2cm, 2cm, 5 cm)		14/04/2012	Caja buen estado, testigo húmedo.
B4	DESCENDENTE	4,40	?		03/08/2011	3/3	(2cm, 2cm, 5 cm)		14/04/2012	Caja buen estado, etiqueta muy mal estado, testigo húmedo.

ANEJO 2

Definicion de los Segmentos de cada testigo

Testigos	Longitud	Segmento 1		Segmento 2		Segmento 3		Segmento 4		Segmento 5		Segmento 6		Segmento 7		Segmento 8		Segmento 9		Segmento 10	
		X _{ini}	X _{fin}																		
B5L	1,93	0,00	0,19	0,20	0,39	0,40	0,58	0,59	0,77	0,78	0,97	0,98	1,16	1,17	1,35	1,36	1,54	1,55	1,74	1,75	1,93
B4L	2,96	0,00	0,30	0,31	0,59	0,60	0,89	0,90	1,18	1,19	1,48	1,49	1,78	1,79	2,07	2,08	2,37	2,38	2,66	2,67	2,96
B5R	2,19	0,00	0,22	0,23	0,44	0,45	0,66	0,67	0,88	0,89	1,10	1,11	1,31	1,32	1,53	1,54	1,75	1,76	1,97	1,98	2,19
B4R	2,35	0,00	0,24	0,25	0,47	0,48	0,71	0,72	0,94	0,95	1,18	1,19	1,41	1,42	1,65	1,66	1,88	1,89	2,12	2,13	2,35
B5A	2,405	0,00	0,24	0,25	0,48	0,49	0,72	0,73	0,96	0,97	1,20	1,21	1,44	1,45	1,68	1,69	1,92	1,93	2,16	2,17	2,41
B5D	4,53	0,00	0,45	0,46	0,91	0,92	1,36	1,37	1,81	1,82	2,27	2,28	2,72	2,73	3,17	3,18	3,62	3,63	4,08	4,09	4,53
B4A	2,9	0,00	0,29	0,30	0,58	0,59	0,87	0,88	1,16	1,17	1,45	1,46	1,74	1,75	2,03	2,04	2,32	2,33	2,61	2,62	2,90
B4D	5,05	0,00	0,51	0,52	1,01	1,02	1,52	1,53	2,02	2,03	2,53	2,54	3,03	3,04	3,54	3,55	4,04	4,05	4,55	4,56	5,05

ANEJO 3

Índice de imágenes pertenecientes a cada segmento de los testigo

Testigo B5L		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P2S2-0
2	P2S2-1	P3S2-1
3	P3S3-0	P4S6-1
4	P5S1-0	P5S6-0
5	P5S6-1	P7S2-0
6	P7S2-1	P8S1-0
7	P8S1-1	P8S5-0
8	P8S5-1	P8S9-1
9	P8S10-0	P9S4-0
10	P9S4-1	P9S8-1

Testigo B4L		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P1S7-1
2	P1S8-0	P2S4-1
3	P2S5-0	P2S10-1
4	P2S11-0	P3S2-0
5	P3S2-1	P3S7-1
6	P3S8-0	P5S2-0
7	P5S2-1	P6S3-1
8	P6S4-1	P7S4-0
9	P7S4-1	P8S6-1
10	P8S7-0	P9S5-1

Testigo B5R		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P1S5-1
2	P1S6-0	P2S7-1
3	P2S8-0	P2S14-1
4	P2S15-0	P3S1-1
5	P3S2-0	P4S10-0
6	P4S4-0	P4S10-0
7	P4S10-1	P5S5-1
8	P5S6-0	P6S5-1
9	P6S6-0	P8S2-1
10	P8S3-0	P8S8-1

Testigo B4R		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P2S2-0
2	P2S2-1	P3S2-0
3	P3S2-1	P4S3-0
4	P4S3-1	P5S8-1
5	P6S1	P6S7-1
6	P6S8-0	P7S5-0
7	P7S5-1	P8S3-0
8	P8S3-1	P9S1-0
9	P9S1-1	P10S2-0
10	P10S2-1	P10S8-1

Testigo B5A		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P15S9-0
2	P15S9-1	P3S1-0
3	P3S1-1	P3S8-0
4	P3S8-1	P4S1-0
5	P4S1-1	P4S8-1
6	P4S9-0	P6S2-0
7	P6S2-1	P6S10-1
8	P6S11-0	P7S7-0
9	P7S7-1	P8S8-0
10	P8S8-1	P9S6-1

Testigo B5D		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P2S7-0
2	P2S7-1	P3S3-0
3	P3S3-1	P4S3-0
4	P4S3-1	P5S6-1
5	P5S7-0	P7S4-0
6	P7S4-1	P8S8-1
7	P9S1-0	P10S7-0
8	P10S7-1	P11S11-0
9	P11S11-1	P14S5-1
10	P15S1-0	P15S11-1

Testigo B5A		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P1S8-0
2	P1S8-1	P2S7-0
3	P2S7-1	P4S3-0
4	P4S3-1	P7S4-0
5	P7S4-1	P7S7-0
6	P7S7-1	P8S4-1
7	P8S5-0	P10S4-0
8	P10S4-0	P12S1-1
9	P12S2-0	P13S4-0
10	P13S4-1	P13S10-1

Testigo B5D		
Segmento	Imagen Inicial	Imagen final
1	P1S1-0	P4S1-0
2	P4S1-1	P6S3-1
3	P6S4-0	P7S13-1
4	P7S14-0	P10S6-0
5	P10S6-1	P12S9-0
6	P12S9-1	P16S2-0
7	P16S2-1	P18S7-0
8	P18S7-1	P20S4-0
9	P20S4-1	P21S7-0
10	P21S7-1	P22S11-1

ANEJO 4

Ubicación de Cortes en los Testigos

Nombre del Testigo:	B5L	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
No. Piezas:	9										
Longitud Teórica (m):	2,50										
Longitud Real (m):	1,93										
		Patrón Corte	-2,2,8,-	-2,2,7,5,2,2,-	-2,2,-	-2,6,2,2,-	-2,2,8,2,-	-8,2,-	-2,2,9,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,-
		X inicial (cm)	0	15	32	39	56	78	94	111	156
		Coord. 1er Corte	1	18,5	37	44	61	82,5	96	117	162
		X final (cm)	15	39	45	58	79	95	116	159	193
		Long. Pieza (cm)	15	24	13	19	23	17	22	48	37
		No. Secciones	5	7	4	6	6	4	7	11	8

Nombre del Testigo:	B4L	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
No. Piezas:	7										
Longitud Teórica (m):	2,95										
Longitud Real (m):	2,96										
		Patrón Corte	-2,9,2,2,9,2,2,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,2,2,9,2,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,-	-9,2,2,2,-	-9,2,-	-2,2,9,2,2,-	-2,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,-	-2,2,2,-
		X inicial (cm)	0	40	113	154	173	193	224	240	279
		Coord. 1er Corte	4	45,0	117	157	178	198,0	228	242	284
		X final (cm)	43	116	158	184	191	215	248	282	296
		Long. Pieza (cm)	43	76	45	30	18	22	24	42	17
		No. Secciones	11	17	9	6	4	8	5	9	5

Nombre del Testigo:	B5R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
No. Piezas:	8									
Longitud Teórica (m):	2,50									
Longitud Real (m):	2,19									
		Patrón Corte	-5,2,2,5,-	-5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,-	-5,2,2,-	-2,2,5,2,2,5,2,2,-	-5,2,2,2,-	-2,5,2,2,5,2,2,-	-2,5,2,2,5,2,2,-	
		X inicial (cm)	0	22	82	98	139	159	163	188
		Coord. 1er Corte	5	25,0	88	106	142	161,0	166	191
		X final (cm)	23	85	102	135	160	185	190	219
		Long. Pieza (cm)	23	63	20	37	21	26	27	31
		No. Secciones	6	20	5	10	6	9	9	8

Nombre del Testigo:	B4R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	
No. Piezas:	10											
Longitud Teórica (m):	?											
Longitud Real (m):	2,35											
		Patrón Corte	-2,2,5,2,-	-5,2,2,5,2,2,-	-5,2,2,5,-	-2,5,-	-2,5,2,2,2,2,-	-5,2,2,5,2,2,5,-	-5,2,2,5,2,2,5,2,2,-	-2,5,2,2,5,2,-	-2,2,5,2,-	-2,5,2,2,5,2,-
		X inicial (cm)	0	17	39	62	74	97	125	156	184	206
		Coord. 1er Corte	4	21,0	44	65	78	100,0	129	161	190	212
		X final (cm)	19	44	62	80	98	128	160	184	208	235
		Long. Pieza (cm)	19	27	23	18	24	31	35	28	25	29
		No. Secciones	6	8	6	4	8	9	11	8	6	8

Nombre del Testigo:	B5A	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
No. Piezas:	9										
Longitud Teórica (m):	2,50										
Longitud Real (m):	2,41										
		Patrón Corte	2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5	-2,-	-5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,-	-2,2,5,2,2,5,2,2,-	-2,2,5,2,-	-5,2,2,5,2,2,5,2,2,2,-	-5,2,2,5,2,2,-	-2,5,2,2,5,2,2,-	-5,2,2,5,-
		X inicial (cm)	0	38	46	96	122	139	172	194	221
		Coord. 1er Corte	2	42,0	50	98	126	141,5	175	198	224
		X final (cm)	40	48	96	123	140	174	196	221	241
		Long. Pieza (cm)	40	10	50	27	18	35	24	27	20
		No. Secciones	13	3	16	10	6	12	8	9	6

ANEJO 5

Ubicación de Cortes en los Testigos

Nombre del Testigo: B5D No. Piezas: 15 Longitud Teórica (m): 4,50 Longitud Real (m): 4,53		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	Patron Corte	-2,9,2,-	-2,9,2,2,9,2,2,9,2,2,9,-	-2,9,2,2,9,2,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,2,-	-2,2,2,9,2,2,-	-2,9,2,9,-	-9,2,2,9,2,2,2,-	-2,2,9,2,2,-
	X inicial (cm)	0	18	85	121	158	184	211	248
	Coord. 1er Corte	2	20,5	87	124	164	187,0	215	250
	X final (cm)	19	85	122	159	185	211	248	272
	Long. Pieza (cm)	19	67	37	38	27	27	38	25
	No. Secciones	5	16	11	10	8	6	10	8

	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Patron Corte	-2,2,9,2,2,-	-2,2,9,2,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,2,2,9,2,-	-,-	-2,-	-2,9,2,-	-9,2,2,9,2,2,9,2,2,-
X inicial (cm)	272	294	316	371	379	389	406
Coord. 1er Corte	274	296	319	376	382	392	409
X final (cm)	295	318	371	379	389	408	453
Long. Pieza (cm)	24	24	55	8	11	19	47
No. Secciones	7	7	13	2	3	5	11

Nombre del Testigo: B4A No. Piezas: 13 Longitud Teórica (m): 2,85 Longitud Real (m): 2,9		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	Patron Corte	-2,2,9,2,2,9,2,2,2,2,-	-2,2,9,2,2,-	-2,2,9,2,-	-9,2,-	-5,-	-2,2,9,2,-	-2,2,9,2,2,9,2,2,-	-2,2,9,-
	X inicial (cm)	0	38	58	76	91	104	124	157
	Coord. 1er Corte	2	40,0	60	79	94	107	126	160
	X final (cm)	38	59	78	92	105	124	158	177
	Long. Pieza (cm)	38	21	20	16	15	20	35	20
	No. Secciones	12	7	6	4	3	6	10	5

	P9	P10	P11	P12	P13
Patron Corte	-9,-	-2,2,9,2,-	-2,2,9,2,2,-	-2,2,9,2,2,2,-	-2,2,9,2,2,9,2,2,-
X inicial (cm)	175	188	206	229	253
Coord. 1er Corte	178	191	211	232	256
X final (cm)	189	209	231	254	290
Long. Pieza (cm)	14	21	25	25	37
No. Secciones	3	6	7	8	10

ANEJO 6

Ubicación de Cortes en los Testigos

Nombre del Testigo: B4D
 No. Piezas: 22
 Longitud Teórica (m): ?
 Longitud Real (m): 5,05

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Patron Corte	-2,2,5,2,-	-2,5,2,2,-	-2,5,2,2,-	-5,2,2,5,-	-2,5,2,2,5,2,-	-2,5,2,2,5,-	5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,-	-2,2,5,2,2,-	-
X inicial (cm)	0	18	33	50	69	92	112	159	176
Coord. 1er Corte	3	20,0	36	52	71	94,0	117	161	181
X final (cm)	18	35	50	69	92	116	160	177	188
Long. Pieza (cm)	18	17	17	20	23	24	48	18	12
No. Secciones	6	6	6	6	8	7	15	7	2

	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
Patron Corte	-2,2,5,2,-	-5,2,2,5,2,2,-	-5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,-	-	-5,-	-	-2,5,2,2,5,2,2,-	-	-2,5,2,2,5,-
X inicial (cm)	188	204	226	275	281	294	299	328	335
Coord. 1er Corte	190	207	229	279	287	-	302	332	337
X final (cm)	204	228	275	286	295	301	328	335	357
Long. Pieza (cm)	17	24	49	11	14	7	29	8	22
No. Secciones	6	8	16	2	3	1	9	2	7

	P19	P20	P21	P22
Patron Corte	5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,-	-2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,-	-2,2,5,2,2,5,2,2,5,2,2,-	5,2,2,5,2,2,5,2,2,-
X inicial (cm)	356	393	436	475
Coord. 1er Corte	358	396	439	475
X final (cm)	395	437	474	505
Long. Pieza (cm)	39	44	38	31
No. Secciones	13	15	13	11