



Trabajo final de grado

Estudio y diseño de un sistema de monitorización en el embalse de Chacrillas (Chile)

Valencia, Septiembre de 2018

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Civil

Curso: 2017/18

AUTOR: Álvaro Potti Guindal

TUTOR: Julia Irene Real Herráiz

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS
(CHILE)

ÍNDICE GENERAL DEL TRABAJO

❖ DOCUMENTO Nº 1: MEMORIA

- MEMORIA
- ANEJO 1: Antecedentes
- ANEJO 2: Estudios previos
- ANEJO 3: Descripción del estado actual
- ANEJO 4: Elección y justificación de las variables a medir. Sensórica a instalar
- ANEJO 5: Tratamiento e interpretación de datos

❖ DOCUMENTO Nº2: PLANOS



DOCUMENTO Nº 1: MEMORIA

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	13
1.1.	OBJETIVOS Y ALCANCE	14
2.	ANTECEDENTES	15
2.1.	TIPOS DE PRESAS	15
2.1.1.	PRESAS DE FÁBRICA.....	16
2.1.2.	PRESAS CON TIPOLOGÍA MIXTA	18
2.1.3.	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS.....	19
2.1.3.1.	Definición	19
2.1.3.2.	Materiales	19
2.1.3.3.	Estabilidad	20
2.1.3.4.	Construcción.....	20
2.1.3.5.	Tipologías constructivas	21
2.1.3.6.	Tipos de falla comunes.....	25
2.2.	INTRODUCCIÓN A LA MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS	27
2.2.1.	LA MONITORIZACIÓN Y SUS TIPOS.....	28
2.2.2.	ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN.....	29
3.	CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE	31
4.	ESTUDIOS PREVIOS.....	32
5.	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL	36
5.1.	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	36
5.2.	MATERIALES QUE CONFORMAN LA PRESA.....	39
5.3.	OBRAS ANEXAS.....	42
5.3.1.	EVACUADOR DE CRECIDAS.....	42
5.3.2.	TÚNEL DE DESVÍO.....	44
5.3.3.	OBRAS DE TOMA, CONDUCCIÓN, ENTREGA U DESAGÜE DE FONDO	45
5.4.	AUSCULTACIÓN ACTUAL	47
6.	DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS Y ELEMENTOS A INSTALAR.	49
6.1.	VARIABLES QUE TENDRÁ EN CUENTA NUESTRO SISTEMA.	49
6.2.	SENSÓRICA A INSTALAR	51
7.	TRATAMIENTO DE DATOS Y SISTEMA DE COMUNICACIÓN	64
8.	CONCLUSIONES	71
9.	BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PENDIENTES TIPO EN TALUDES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS SEGÚN TIPOLOGÍA.....	20
TABLA 2: PORCENTAJE DE FALLAS PRINCIPALES EN PRESAS DE MATERIALES. FUENTE: ICOLD.	26
TABLA 3: DISTRIBUCIÓN DE LOS FALLOS PRINCIPALES DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS SEGÚN LA EDAD DE LA PRESA. FUENTE: ICOLD.	26
TABLA 4: GRANDES PRESAS DE MATERIALES SUELTOS EN CHILE CLASIFICADAS POR PERIODO DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: COMITÉ NACIONAL CHILENO DE GRANDES PRESAS.....	34
TABLA 5: COORDENADAS UTM DE LA LÍNEA DE CORONACIÓN DEL EMBALSE DE CHACRILLAS (DATUM PSAD 56, HUSO 19). FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	36
TABLA 6: DATOS GENERALES DEL EMBALSE DE CHACRILLAS. FUENTE: ICOLD CHILE.	38
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PRESA. FUENTE: ICOLD CHILE.	38
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VERTEDERO. FUENTE: ICOLD CHILE.	38
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE. FUENTE: ICOLD CHILE.	39
TABLA 10: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REGISTRADOR DE NIVEL DE AGUA WWL. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	51
TABLA 11: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SENSOR DE DEFORMACIÓN D233. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.....	52
TABLA 12: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SENSOR DE TEMPERATURA 0T111PT1000. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	53
TABLA 13: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE P235S. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.....	54
TABLA 14: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ACCELERÓMETRO TRIAXIAL DE POZO PARA PERFORACIONES DE PROFUNDIDAD MEDIA. FUENTE: CATÁLOGO KINEMATRICS.....	58
TABLA 15: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MEDIDOR DE JUNTAS D233. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	58
TABLA 16: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REGISTRADOR DE NIVEL DE AGUA WWL. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	59
TABLA 17: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Sonda de Asientos Profiler. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	61
TABLA 18: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REGISTRADOR DE DATOS ADK-100. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA PRINCIPALES TIPOLOGÍAS DE PRESAS. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	15
FIGURA 2: ESQUEMA PRESA DE GRAVEDAD TIPO. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	16
FIGURA 3: ESQUEMA PRESA EN ARCO TIPO. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	17
FIGURA 4: ESQUEMA PRESA EN ARCO TIPO VISTO EN PLANTA. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	17
FIGURA 5: ESQUEMA PRESA DE CONTRAFUERTE TIPO. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	17
FIGURA 6: PRESA HIDROELÉCTRICA DE BÓVEDAS MÚLTIPLES EN QUEBEC, CANADÁ. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.	18
FIGURA 7: PRESA ARCO-GRAVEDAD CAYARA EN EL MUNICIPIO DE YOCALLA, POTOSÍ. FUENTE: GOOGLE IMÁGENES.	18
FIGURA 8: ESQUEMA PRESA MATERIALES SUELTOS TIPO. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	19
FIGURA 9: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA SIN DREN. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	22
FIGURA 10: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA CON DREN DE PIE. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	22
FIGURA 11: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA CON CAPA DRENANTE HORIZONTAL. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	22
FIGURA 12: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA CON DREN LONGITUDINAL Y DRENES TRANSVERSALES. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	23
FIGURA 13: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA CON DREN CHIMENEA. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	23
FIGURA 14: ESQUEMA FORMACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESA HOMOGÉNEA CON DRENES DE DISIPACIÓN DE PRESIONES INTERSTICIALES DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO.	23
FIGURA 15: ESQUEMA DE LAS PARTES PRINCIPALES DE UNA PRESA HETEROGÉNEA CON NÚCLEO VERTICAL. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	24
FIGURA 16: ESQUEMA DE LAS PARTES PRINCIPALES DE UNA PRESA HETEROGÉNEA CON NÚCLEO INCLINADO AGUAS ARRIBA. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	25
FIGURA 17: FICHA TÉCNICA DECRETO 50. FUENTE: BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE.	31
FIGURA 18: ESQUEMA REGIONES CHILENAS. FUENTE: IMÁGENES DE GOOGLE.	32
FIGURA 19: GRÁFICO USO DEL AGUA POR SECTOR EN CHILE. FUENTE: COMITÉ NACIONAL CHILENO DE GRANDES PRESAS.	33
FIGURA 20: MONITORIZACIÓN EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS CHILENAS. FUENTE: COMITÉ NACIONAL CHILENO DE GRANDES PRESAS.	33
FIGURA 21: FOTOGRAFÍA DEL ESTADO ACTUAL DEL EMBALSE DE CHACRILLAS. FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	36
FIGURA 22: MAPA DE SITUACIÓN DE LA ZONA DE RIEGO DEL EMBALSE DE CHACRILLAS. FUENTE: FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	37
FIGURA 23: ESQUEMA MATERIALES QUE CONFORMAN LA PRESA. FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	39
FIGURA 24: FOTOGRAFÍA DEL MATERIAL QUE CONFORMA EL TALUD DE AGUAS ABAJO. FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	41
FIGURA 25: FOTOGRAFÍA DEL MATERIAL QUE CONFORMA EL TALUD DE AGUAS ARRIBA. FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	42
FIGURA 26: FOTOGRAFÍA EVACUADOR DE CRECIDAS (1). FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	43
FIGURA 27: FOTOGRAFÍA EVACUADOR DE CRECIDAS (2). FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	43
FIGURA 28: FOTOGRAFÍA TÚNEL DE DESVÍO (1). FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	44
FIGURA 29: FOTOGRAFÍA TÚNEL DE DESVÍO (2). FUENTE: FOTOGRAFÍAS REALIZADAS DURANTE LA VISITA.	45
FIGURA 30: SECCIÓN TIPO, TRAMO AGUAS ARRIBA DE LA CAVERNA DE VÁLVULAS. FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	46

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

FIGURA 31: SECCIÓN TIPO, TRAMO AGUAS ABAJO DE LA CAVERNA DE VÁLVULAS. FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	46
FIGURA 32: SECCIÓN CAVERNA DE VÁLVULAS (SECTOR TAPÓN). FUENTE: PROYECTO CONSTRUCCIÓN EMBALSE DE CHACRILLAS.	47
FIGURA 33: ESQUEMA ACOTADO SENSOR DE DEFORMACIÓN D233. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	52
FIGURA 34: ESQUEMA ACOTADO SENSOR DE TEMPERATURA OT111PT1000. FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	53
FIGURA 35: ESQUEMA DE LA PUESTA EN OBRA DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	53
FIGURA 36: ESQUEMA ACOTADO PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE P235S (1). FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	54
FIGURA 37: ESQUEMA ACOTADO PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE P235S (2). FUENTE: CATÁLOGO SISGEO.	55
FIGURA 38: ESQUEMA PUESTA EN OBRA PIEZÓMETRO DE CUERDA VIBRANTE P235S. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	56
FIGURA 39: ACCELERÓMETRO TRIAXIAL DE POZO PARA PERFORACIONES DE PROFUNDIDAD MEDIA. FUENTE: IMÁGENES DE GOOGLE.	57
FIGURA 40: ESQUEMA PIEZÓMETRO DE CASAGRANDE. FUENTE: BLOG DE INGENIERÍA.	60
FIGURA 41: PLANO EN PLANTA DEL EMBALSE DE CHACRILLAS (DOCUMENTO Nº 2 – PLANOS). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	62
FIGURA 42: PLANO DEL PERFIL TRANSVERSAL DE LA SECCIÓN NORTE DEL EMBALSE DE CHACRILLAS (DOCUMENTO Nº 2 – PLANOS). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	62
FIGURA 43: PLANO DEL PERFIL TRANSVERSAL DE LA SECCIÓN SUR DEL EMBALSE DE CHACRILLAS (DOCUMENTO Nº 2 – PLANOS). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63

1. INTRODUCCIÓN

Las presas son estructuras que llevan asociados una gran cantidad de riesgos de gran envergadura, tanto sociales como económicos y medioambientales, ya que su rotura puede suponer una enorme catástrofe para el entorno en la que esté ubicada.

Es una de las obras que más satisfacciones técnicas pueden dar y requiere, quizás como ninguna, de la colaboración de varios especialistas correctamente coordinados. Por otro lado, en el ámbito social y económico, las presas son unas de las construcciones que más beneficios dan, de ahí su valor político.

El correcto y seguro comportamiento de las presas es un asunto de extrema importancia para la seguridad de la población y la economía de un país. Por consiguiente, resulta imprescindible disponer de medios de recogida de información que sean útiles para evaluar el comportamiento y la seguridad de las presas. Para conseguir este objetivo, tradicionalmente los ingenieros de la especialidad de presas han recurrido a medidas directas en la propia infraestructura realizadas manualmente.

¿Por qué se ausculta? La razón principal es que permite proporcionar información temprana sobre el comienzo o desarrollo de daños que puedan poner en peligro la seguridad de la obra, pudiendo tomar a tiempo las medidas necesarias. Además, cabe destacar que de entre las causas principales que dan lugar a una obra defectuosa, una gran parte de los siniestros se producen por ausencia, insuficiencia o mala interpretación de los reconocimientos realizados.

En los últimos años, el aprovechamiento del recurso hídrico en Chile ha desempeñado un papel fundamental para el desarrollo del país, ya que para garantizar un desarrollo social y productivo sostenible se necesitan obras de regulación que acumulen agua para los periodos de escasez.

Por el contrario, pese a la gran importancia de este recurso, aun existen zonas en el país que no pueden acceder a este básico, como las zonas rurales.

De acuerdo a estos niveles de escasez y disponibilidad de agua, resulta evidente la necesidad de que el desarrollo de la infraestructura hídrica se centre además de en la construcción de nueva infraestructura, de modernizar la existente, donde claramente Chile se encuentra retrasado con respecto a los países más desarrollados.

Este proyecto pretende colaborar con dicha modernización implantando un sistema de monitorización de las principales variables de una presa de materiales sueltos en Chile, llevando a cabo un análisis de los principales elementos de auscultación y realizando una propuesta de aquellos considerados más idóneos para conocer en tiempo real el estado y la salud de la presa.

1.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

Como se puede deducir en el apartado de introducción, el objetivo de este Trabajo de Final de Grado **es proponer un sistema de monitorización de las principales variables (presión intersticial, asientos, temperatura, apertura de fisuras y juntas, nivel del embalse y aceleraciones del terreno) que permita conocer el estado general de una presa de materiales sueltos de Chile desde el punto de vista geotécnico.**

No obstante, para que este objetivo pueda llevarse a cabo, se requiere de la instalación de una serie de instrumentos y sensores geotécnicos cuya elección, instalación y funcionamiento puede resultar complejo y de los cuales depende el éxito de la solución. Por este motivo, del objetivo general se descuelgan una serie de objetivos secundarios como a continuación se desglosa:

- ✓ Por un lado, se busca conocer en profundidad como es el funcionamiento de las presas de materiales sueltos, así como cuales son los principales modos de falla que se dan y qué condiciones que los provocan. Además, será importante conocer el estado de la monitorización en el país en este tipo de infraestructuras para saber cuáles son las principales carencias.
- ✓ En función de este problema-necesidad, se establecerán las principales variables a monitorizar con las que conocer el estado general de una presa de materiales sueltos.
- ✓ Por otro lado, en función de cada una de las variables propuestas se buscará proponer la instalación de un conjunto de aparatos de medición y sensores con los que tenerlas controladas de la manera más óptima. Esta selección tendrá en cuenta el estado actual de la presa objeto de estudio, ya que como se verá durante el desarrollo del trabajo ya dispone de algún aparato de auscultación que se puede aprovechar para desarrollar nuestro sistema de monitoreo.
- ✓ Una vez se hayan seleccionado y definido los aparatos y sensores que se quieren instalar en la presa, se buscará desarrollar el sistema a nivel completo, incluyendo la ubicación de cada uno de los sensores, métodos de instalación, sistemas de comunicación y el tratamiento a realizar en la información medida para que sea fácilmente interpretable por el ente gestor.

De esta forma, el alcance del presente Trabajo Final de Grado consistirá en el desarrollo de un sistema de monitorización de variables en una presa de materiales sueltos de Chile con el que conocer su estado general desde el punto de vista geotécnico, quedando totalmente definido con objetivos anteriormente expuestos.

2. ANTECEDENTES

Una presa es una construcción que tiene por objeto contener el agua de un cauce natural con dos fines, alternativos o simultáneos, según los casos:

- Elevar su nivel para que pueda derivarse por una conducción (creación de altura).
- Formar un depósito que, al retener los excedentes, permita suministrar el líquido en los momentos de escasez (creación de embalses)

Para ello deben ser impermeables, de manera que no dejen pasar el agua a su través y, obviamente, resistentes ante los empujes que ésta ejerce sobre el cuerpo de presa. Los diferentes tipos de presas responden a las diversas posibilidades de cumplir la doble exigencia de resistir el empuje del agua y evacuarla cuando sea preciso. En cada caso, las características del terreno y los usos que se le quiera dar al agua condicionan la elección del tipo de presa más adecuado.

En general, en cuanto una presa tiene una determinada altura, existe un efecto de embalse, que suele ser predominante. De esto resulta que la función mecánica esencial de una presa suele ser elevar el nivel natural del río, deduciendo de esta manera que la sobrecarga principal de la estructura será el empuje del agua, y este a su vez determina el concepto resistente.

Las presas son de las estructuras más seguras, lo que no impide que, a veces, se den accidentes e incluso catástrofes. Por ello, es forzoso extremar la garantía de seguridad.

2.1. TIPOS DE PRESAS

Aunque existen numerosas tipologías de presas, en líneas generales podemos clasificarlas en dos grandes grupos: **presas de fábrica** (de hormigón) y **presas de materiales sueltos**, siendo estas últimas las más comunes por su versatilidad.

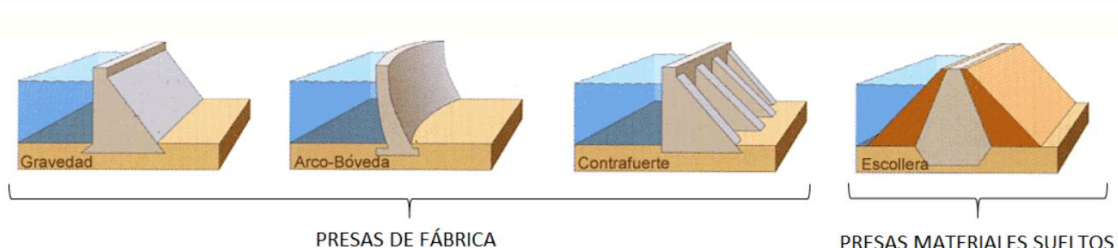


Figura 1: Esquema principales tipologías de presas. Fuente: blog de ingeniería.

2.1.1. PRESAS DE FÁBRICA

- **Presas de gravedad:** son aquellas que presentan un peso notable que sirve para, al componerse con el empuje, dar una resultante adecuada y francamente interior a la base de la presa. A su vez, estas pueden ser macizas o aligeradas, siendo fabricadas las segundas con menos cantidad de material. El aligeramiento puede consistir en galerías horizontales o, de forma más frecuente, en huecos verticales, quedando constituida la presa por una serie de contrafuertes resistentes por su peso en los que se apoya o va unida a una pantalla que transmite a ellos el empuje del agua.

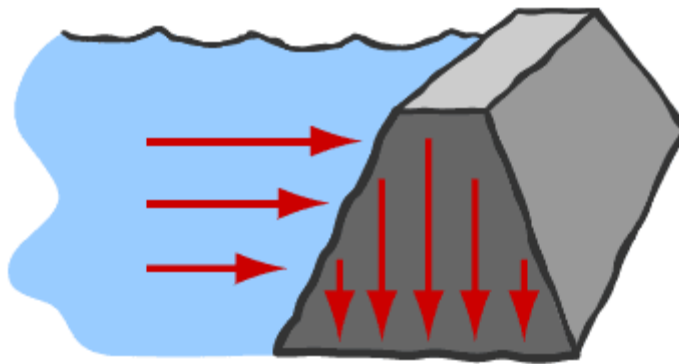


Figura 2: Esquema presa de gravedad tipo. Fuente: blog de ingeniería.

- **Presas en arco:** son aquellas que utilizando una forma curva en planta, logran transmitir el empuje del agua al terreno circundante con una dirección e intensidad adecuada para resistir de forma estable. Pueden tener la curvatura sólo en el sentido horizontal o tanto en el sentido horizontal como en el vertical (doble curvatura).

La principal ventaja de esta tipología de presa es que necesita menos cantidad de hormigón para ser construida. Por el contrario, su principal inconveniente es que resulta difícil encontrar un emplazamiento donde se pueda construir.

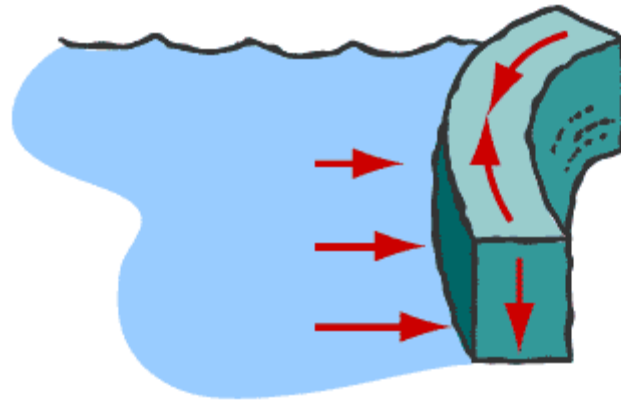


Figura 3: Esquema presa en arco tipo. Fuente: blog de ingeniería.

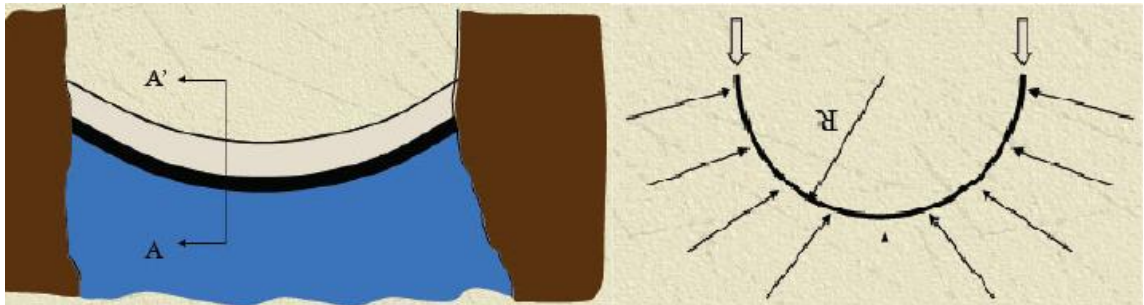


Figura 4: Esquema presa en arco tipo visto en planta. Fuente: blog de ingeniería.

- **Presas de contrafuertes o aligeradas:** este tipo de presas funciona con un mecanismo parecido a las presas de gravedad, ya que tiene su cabeza inclinada y apoyada en unos elementos alargados a modo de contrafuertes, como su propio nombre indica, que resisten por gravedad. Estos elementos de contención reciben el nombre de colas y están colocados aguas debajo de la presa.

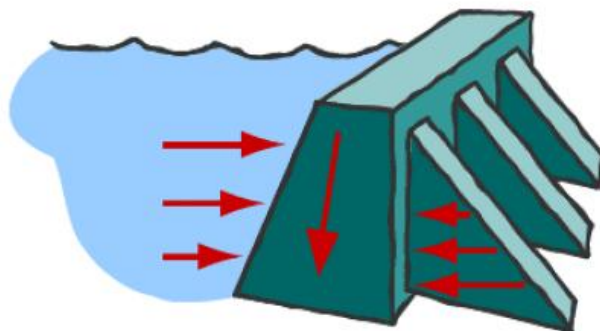


Figura 5: Esquema presa de contrafuertes tipo. Fuente: blog de ingeniería.

2.1.2. PRESAS CON TIPOLOGÍA MIXTA

- **Bóvedas múltiples:** está constituido por una serie de contrafuertes que resisten por gravedad al empuje hidrostático que les transmiten unas bóvedas en contacto directo con el agua.



Figura 6: Presa Hidroeléctrica de Bóvedas Múltiples en Quebec, Canadá. Fuente: google imágenes.

- **Arco-gravedad:** es un tipo intermedio entre las presas de arco y las presas de gravedad. En esta tipología, la acción de la curvatura es insuficiente para resistir el empuje y hay que dar a la presa un cierto peso para que compense ese defecto.



Figura 7: Presa arco-gravedad Cayara en el municipio de Yocalla, Potosí. Fuente: google imágenes.

2.1.3. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

2.1.3.1. Definición

Las presas de materiales sueltos son presas que están formadas por rocas o tierras sueltas sin cementar, en cuya composición intervienen materiales naturales (rocas, piedras, gravas, arenas, limos y arcillas) que son tratados sin sufrir ningún proceso químico de transformación y colocados mediante procedimientos de compactación propios de la mecánica de suelos para la construcción de la presa. Son denominadas como presas de escollera cuando más del 50 % del material está compuesto por piedra y presas de tierra cuando son materiales de granulometrías más pequeñas.

Para conseguir la impermeabilidad de la presa se construyen pantallas impermeables de arcilla, asfalto o algún material sintético. Se usan preferentemente cuando el sitio donde se apoya la presa no resiste las cargas que puede ejercer una presa de hormigón o bien por el hecho de que resulte más rentable proceder a la recogida y tratamiento (machaqueo y clasificación) del material local para configurar la presa, que fabricar el hormigón con similares intenciones.

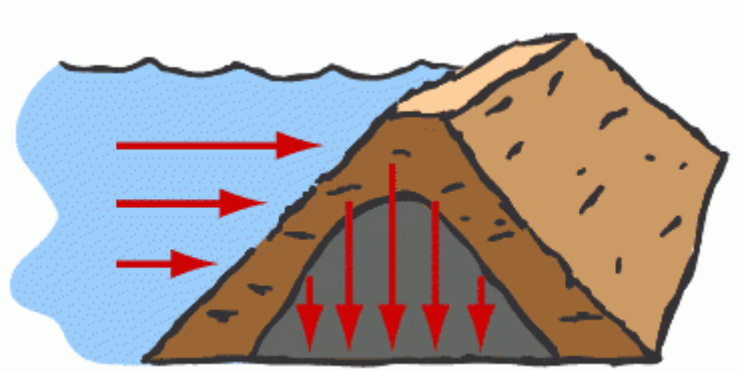


Figura 8: Esquema presa materiales sueltos tipo. Fuente: blog de ingeniería.

2.1.3.2. Materiales

El criterio para construir una presa de materiales sueltos en vez de una presa de hormigón puede ser debido principalmente a dos motivos, bien por la escasa calidad del cemento como se ha mencionado anteriormente o bien el hecho de que resulte más rentable proceder a la recogida y tratamiento (machaqueo y clasificación) del material local para configurar la presa que fabricar el hormigón con similares intenciones. En cualquier caso, deberá someterse cada caso particular a un profundo análisis que englobe la caracterización de las propiedades geológicas y geotécnicas del entorno, como otros factores entre los que destacan: calidad de los materiales autóctonos, posibilidad de instalar una planta de machaqueo de piedra, distancias de transporte, sensibilidad medioambiental, etc.

Las presas de materiales sueltos tienen la ventaja de que pueden ser construidas casi con cualquier material y equipo de construcción, utilizándose en muchos casos para su construcción equipos rudimentarios. Entre los materiales más utilizados, con los que se ha construido con éxito, destacan: grava, arena, limo, polvo de roca y arcilla. Por ejemplo, para aprovechar al máximo los materiales de la zona, si se dispone de gran cantidad de un material permeable como arena o grava estaríamos lo más seguro en una buena zona para construir una presa de esta tipología ya que solo haría falta importar material impermeable para la construcción del núcleo.

En cuanto al relleno, puede estar conformado de rocas de tamaños varios, que pueden ir desde pequeños fragmentos hasta rocas de 25t. Para compactar el relleno se dejan caer las rocas, a veces desde alturas de hasta 40 metros, hacia el relleno. Otro método sería lavar los finos de entre los puntos de contacto entre las rocas y reducir el asentamiento.

2.1.3.3. Estabilidad

Para asegurar la estabilidad de los taludes que configuran las presas de materiales sueltos rara vez son mayores de 2 horizontales por 1 vertical y suelen ser de 3 a 1. La razón principal para seguir estas proporciones es el aseguramiento de la estabilidad de los taludes en contra de una falla por deslizamiento.

Por otro lado, la estabilidad bajo la acción de fuerzas sísmicas es excesivamente crítica, especialmente para suelos en los que se forman cambios de presión de poro como resultado de las deformaciones por esfuerzo constante inducido por un terremoto, ya que es muy difícil la determinación de valores apropiados para la aceleración de deformación. Es más, para algunos tipos de suelos, no ocurren desplazamientos en una amplia variedad de aceleraciones.

Tipo de presa	Presa homogénea	Presa heterogénea de núcleo de arcilla	Presa heterogénea de pantalla asfáltica
Taludes	2H/1V a 4H/1V	1,5H/1V a 1,6H/1V	1,75H/1V

Tabla 1: Pendientes tipo en taludes de presas de materiales sueltos según tipología.

Otro factor que, a veces, determina la inclinación de los taludes es la cantidad de filtración que puede tolerar. Si la cortina está sobre un cimiento permeable, puede ser necesario aumentar el ancho de la base para reducir la filtración.

2.1.3.4. Construcción

Las cortinas de terraplén pueden ser construidas de casi cualquier altura incluso sobre cimientos que no son excesivamente fuertes. Esto es debido a que las mejoras en los equipos

de construcción, concretamente en los equipos de movimientos de tierras, han reducido de manera considerable el costo de la construcción de la cortina de tierras, mientras crecientes costos de mano de obra han aumentado los de la construcción de cortinas de concreto.

Las cortinas de enrocamiento suelen consistir en un relleno de roca descargada desde camiones de volquete, una capa de tierra prieta más chica tendida en la cara de aguas arriba, que se liga en la roca descargada y un revestimiento importante impermeable aguas arriba que apoya sobre la capa de piedra, con un muro de guarda o dentellón que se extiende dentro del cimientado (Este es el caso del Embalse de Chacrillas).

2.1.3.5. Tipologías constructivas

La subclasificación de las presas de materiales sueltos puede hacerse en función de muchas características. A continuación expondremos las principales distinciones a la hora de realizar subgrupos:

De acuerdo a los materiales utilizados:

- **Presas de tierra:** en las cuales el volumen principal del cuerpo de la presa se hace con suelos arcillosos, arenosos, o gravas de grano fino.
- **Presas de roca-tierra:** en la cuales el volumen principal del cuerpo de la presa se de suelos de grano grueso y los elementos anti filtrantes de grano fino.
- **Presas de enrocados:** en la cuales la parte principal del cuerpo de la presa se construye con materiales de grano grueso y los materiales anti filtrantes se hace con materiales aglutinados (pantallas anti filtrantes).

Según el esquema constructivo de la presa:

- **Presas homogéneas:** cuando el material que las forman tiene las mismas características en todos sus puntos, pudiendo ser materiales más o menos impermeables.

Dentro de las presas de sección homogénea, según la forma de combatir contra las filtraciones, encontramos los siguientes tipos:

- Presas homogéneas sin dren:

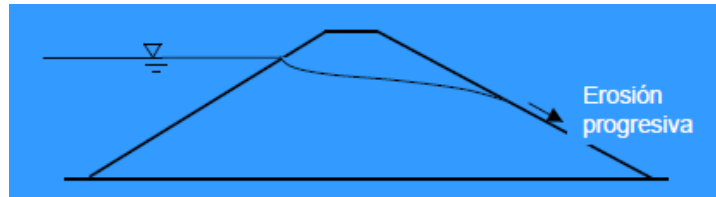


Figura 9: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea sin dren. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Presas homogéneas con dren de pie:

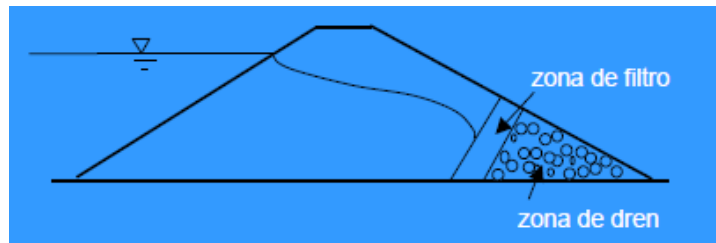


Figura 10: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea con dren de pie. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Presas homogéneas con capa drenante horizontal:

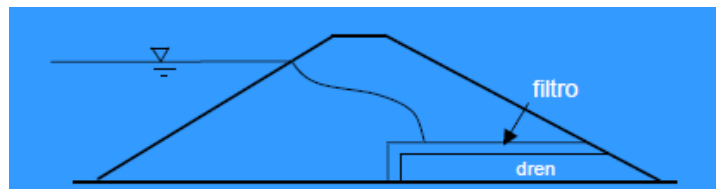


Figura 11: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea con capa drenante horizontal. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Presas homogéneas con dren longitudinal y drenes transversales

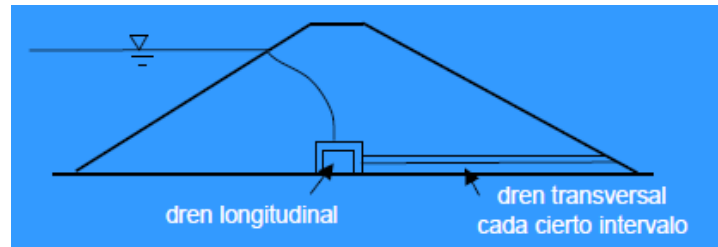


Figura 12: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea con dren longitudinal y drenes transversales. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Presa homogénea con dren chimenea:

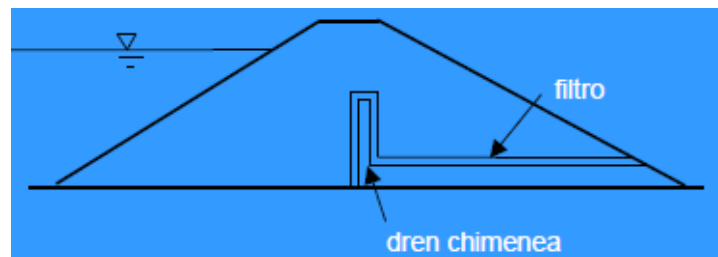


Figura 13: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea con dren chimenea. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- Presa con drenes de disipación de presiones intersticiales de construcción:

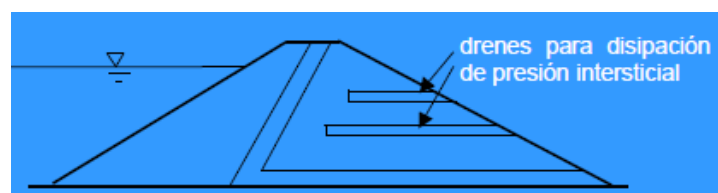


Figura 14: Esquema formación de filtraciones en presa homogénea con drenes de disipación de presiones intersticiales de construcción. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- **Presas heterogéneas:** cuando están construidas a partir de distintos materiales zonificados, con núcleo impermeable y materiales más permeables a medida que nos alejamos del centro de la presa. Son las más comunes.

Las presas heterogéneas a su vez se dividen según la colocación del elemento anti filtrante:

- Presas con núcleo vertical:

Ventajas de los núcleos verticales:

- Permiten taludes de aguas arriba más inclinados.
- Núcleo más grueso, para un volumen dado de material.
- Mayor presión vertical contra el contacto núcleo-cimentación (plano de debilidad favorable a la filtración de agua).

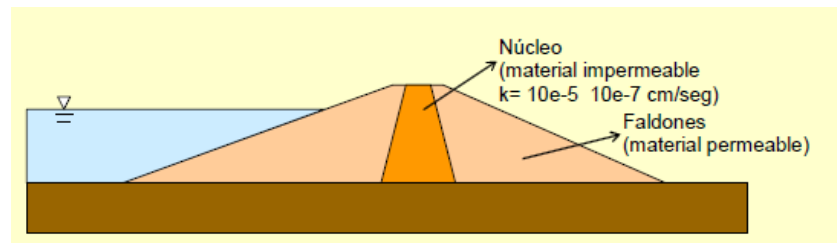


Figura 15: Esquema de las partes principales de una presa heterogénea con núcleo vertical.
Fuente: blog de ingeniería.

- Presas con núcleo inclinado:

Ventajas de los núcleos inclinados hacia aguas arriba:

- Construcción más fácil en climas húmedos.
- El filtro se coloca y compacta directamente sobre el talud
- Fuerzas de filtración orientadas favorablemente para la estabilidad de la presa
- Talud de aguas arriba más estable
- Núcleo menos vulnerable a la fisuración y fracture hidráulica
- Mayor estabilidad en caso de sismo de la zona de la presa no saturada (no vulnerable al aumento de la presión de poros).

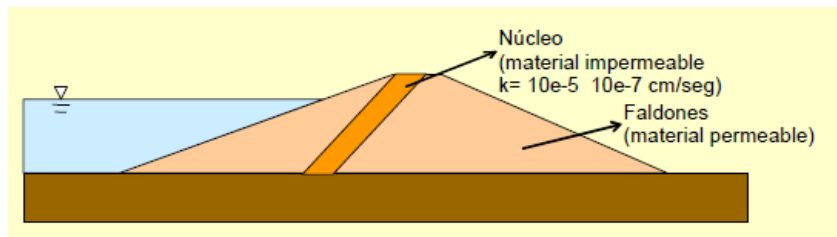


Figura 16: Esquema de las partes principales de una presa heterogénea con núcleo inclinado aguas arriba. Fuente: blog de ingeniería.

2.1.3.6. Tipos de falla comunes

- **Rebosamiento:** El rebosamiento es la causa principal del fallo de presas de materiales sueltos, producido por una inadecuada previsión de avenidas y un adecuado control del nivel del agua del embalse. Debido al rebosamiento existen dos comportamientos fundamentales de fallo, que son la **erosión hidráulica** progresiva y el **deslizamiento** masivo, que es cuando ocurre el colapso total de la estructura pudiendo provocar pérdidas de vidas humanas.
- **Pérdidas por filtración:** Infiltración del agua del embalse a través del cimiento o de la cortina. Se produce por construcción del embalse en presencia de zonas cársticas, fallas o suelos dispersivos y por un inadecuado control de las filtraciones (drenes, colchones, etc) del terraplén.
- **Deslizamiento de taludes:** Es el colapso repentino de la estructura del talud, que se produce por la presencia de esfuerzos cortantes mayores a la resistencia que pueden movilizar hacia abajo los materiales de la superficie.
- **Fugas en conductos:** Son fugas de agua en conductos de tomas de agua o descargas de fondo y se producen por deficiente compactación lateral del material que rodea el tubo. Dichas fugas pueden producir fenómenos de tubificación, en los que el agua consigue ir abriendo camino a través de la grieta como consecuencia de tener una presión hidráulica elevada, superior a la presión vertical de las tierras, hasta formar un conducto que une el embalse con el pie del talud aguas abajo atravesando el núcleo interno.
- **Erosión de taludes:** Es la pérdida de material proveniente del talud de aguas arriba debido a la incidencia repetida de olas generadas en el embalse, dando lugar a importantes problemas en el mantenimiento de la presa. Para proteger superficialmente el talud, se pueden optar por varias medidas, como la colocación de escollera vertida, la fabricación de una pantalla de hormigón armado o el recubrimiento de la zona con suelo-cemento o con una pantalla asfáltica.

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS
(CHILE)

A continuación, se expone una tabla resumen con los porcentajes de ocurrencia de estos fallos según la International Comision on Large Dams (ICOLD):

CAUSA	PORCENTAJE
Rebosamiento	30
Filtración a través de la presa o en el cimiento	25
Deslizamientos	15
Fugas en conductos	13
Erosión de taludes	5
Otras, o combinación de varias causas	7
Desconocida	5

Tabla 2: Porcentaje de fallas principales en presas de materiales. Fuente: ICOLD.

Cabe destacar también, que cada uno de los fallos presenta una distribución temporal distinta según la edad de la presa. Por ejemplo, el fallo por deslizamiento o por fuga en conducto ocurre mayoritariamente a edades tempranas, tendiendo a 0 cuando la presa tiene más de 40 años. En cambio, el fallo por rebosamiento se mantiene más regular en el tiempo sin seguir una frecuencia concreta.

Distribución de fallos en función de la edad de la presa				
Nº DE AÑOS DESDE EL FIN DE LA CONSTRUCCIÓN	REBOSAMIENTO %	FILTRACIÓN %	DESLIZAMIENTO %	FUGA EN CONDUCTO %
0-1	9	16	29	23
1-5	17	34	24	50
5-10	9	13	12	9
10- 20	30	13	12	9
20-30	13	12	12	5
30-40	10	6	11	4
40-50	9	6	0	0
50-100	3	0	0	0

Tabla 3: Distribución de los fallos principales de las presas de materiales sueltos según la edad de la presa. Fuente: ICOLD.

2.2. INTRODUCCIÓN A LA MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS

Desde la rotura de la presa de Tetón (USA) en 1996, el mundo ha sufrido una gran evolución en cuanto a la forma de interpretar el funcionamiento de las presas, las inundaciones y el conjunto de infraestructuras críticas que condicionan la seguridad del ciudadano. Además, todo ello ha demandado un incremento en los niveles de seguridad y fiabilidad de todas estas infraestructuras, obligando a que el diseño, la construcción y la operación de estas deba integrarse en un marco de gestión de riesgo que permita de forma efectiva mitigar cualquier tipo de amenaza.

El riesgo es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo es de probable que pase y cuáles son sus consecuencias. Aplicado a la seguridad de presas, el qué puede pasar se refiere al fallo de la presa; el cómo es de probable de que pase es la combinación de la probabilidad de que se presenten unas determinadas cargas y la probabilidad condicional de rotura de la presa con dichas cargas; y, por último, las consecuencias son aquellas que se derivan del fallo de la presa, incluyendo entre otras las pérdidas económicas, sociales y humanas.

Existen varios efectos adversos o consecuencias que se pueden producir en el caso de que se produzca el fallo de una presa:

- Daños a personas: además de contemplar el número de pérdidas humanas, los daños a personas también incluyen otros aspectos como el número de personas heridas de mayor o menor gravedad.
- Daños económicos directos: son los que se producen por el impacto de la inundación y son los más visibles. Incluyen el coste de los daños de la propia presa.
- Daños económicos indirectos: son los que se dan después del impacto del evento y se reflejan en la economía y otras actividades de la zona.
- Otros daños: en este grupo se incluyen los daños medioambientales, la pérdida de reputación, la afección del patrimonio histórico, etc. Todos ellos son muy difíciles de cuantificar por lo que normalmente son tratados de forma cualitativa.

Todos estos daños se podrán evitar gracias a la implantación de un sistema de monitorización similar al que se describe en este trabajo.

2.2.1. LA MONITORIZACIÓN Y SUS TIPOS

La monitorización de estructuras es una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura. Actualmente, la monitorización estructural tiene una gran importancia, siendo algunas de las causas de auge las siguientes:

- A medida que el nivel de desarrollo de un país aumenta, estos tienen menos infraestructura que construir y más infraestructuras antiguas que mantener y conservar.
- Los avances científicos y tecnológicos hacen posible que hoy en día se pueda proyectar y construir estructuras cada vez más complejas.
- Los accidentes producidos han sensibilizado a la opinión pública sobre la importancia de invertir en el mantenimiento y gestión de la infraestructura civil.

Actualmente existen una amplia variedad de sistemas de monitorización que son aplicables a la instrumentación y evaluación de las estructuras. Los más conocidos y empleados son:

- **Inspección visual:** utilizado en problemas estructurales que impliquen grandes deformaciones o patologías en avanzado estado de degradación (Vurpillot et al. 1998).
- **Métodos topográficos:** deformaciones relativamente grandes, del orden de milímetros (Inaudi, 1997).
- **Métodos basados en radar:** fisuración, exploración de anclajes, localización de armaduras, detección de objetos en el suelo, instalaciones enterradas y cimentaciones (Otsuka et al. 2003).
- **Métodos basados en rayos X:** localización de diámetro y distribución de armaduras, inspección de cables de pretensado, y fisuración y homogeneidad del hormigón (Joachim, 2003).

- **Métodos acústicos:** fisuración del hormigón (Yuyama et al. 2007, Baifeng y Weiliam 2008).
- **Métodos fotogramétricos:** desplazamientos, deformaciones y aberturas de fisuras (Whiteman et al. 2002, Lange et al. 2006, Torres et al. 2010).
- **Métodos basados en termografía:** fisuración, coqueras y otros defectos en el hormigón (Clark et al 2003, Carosena 2006).
- **Métodos basados en flujos magnéticos:** estado de las armaduras en una estructura de hormigón armado y, en general, en aquellos materiales que pueden ser magnetizados por la acción de un campo magnético, como es el caso del acero (Villalba, 2006).
- **Métodos basados en tecnología GPS:** deformaciones.
- **Métodos basados en galgas eléctricas:** deformaciones.
- **Métodos basados en fibra óptica:** temperaturas, deformaciones, filtraciones y desplazamientos (Moyo, 2005).

2.2.2. ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Los dispositivos de medición son elementos imprescindibles en los sistemas de monitorización de estructuras. La selección equivocada de los dispositivos, de su emplazamiento y de su modo de instalación puede repercutir negativamente en los resultados obtenidos en cualquier sistema de control.

Un sistema de monitorización se compone de los siguientes elementos: transductores, sistemas de procesado y acondicionamiento de señal, líneas de transmisión, y sistemas de procesado y registro de datos. A modo de introducción, los sensores y transductores son dispositivos eléctricos capaces de convertir una magnitud física en una variable eléctrica. A continuación se explican dichos componentes de manera más precisa:

- **Transductor:** es todo dispositivo que transforma una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física (convierte un tipo de energía en otra). Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan

pequeña que puede despreciarse y se interpreta que se mide únicamente la otra variable.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor. No obstante, comúnmente se consideran por transductores aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica, debido al gran interés de este tipo de señales en la mayoría de dispositivos de medida.

- **Sensor:** Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida. Es un dispositivo que, sin necesidad de fuente de alimentación externa, es capaz de convertir una magnitud física en otra equivalente. A menudo, el sensor capta sólo la información, en el sentido de que la magnitud de salida no posee las mismas características energéticas que la energía poseída por el original.

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: permite adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño no pueden ser percibidas por ninguno de los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas.

- **Convertidor:** si el sensor da una magnitud física de salida difícil de manipular, es posible conectarlo a un circuito capaz de convertir esta magnitud en una sencilla de manipular. Este circuito es el denominado convertidor. La conexión en cascada de un sensor y un convertidor se obtiene, entonces, por un transductor que es un dispositivo que, alimentando por un generador externo, es capaz de convertir las magnitudes que pertenecen a un sistema de energía en cantidades equivalentes que pertenecen a un sistema de energía diferente.

- **Acondicionamiento y presentación de la información:**

Los acondicionadores de la información son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir del output de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o que permita un procesamiento posterior. Consisten en circuitos electrónicos que ofrecen, en otras funciones, las siguientes: filtrado, amplificado, modulado o adaptación de impedancias.

3. CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE

En cuanto a la **normativa aplicable**, en el decreto 50 del Código de Aguas, concretamente en el artículo 18 apartado “d” en el que dice se expone la descripción funcional del **sistema de control y monitoreo**, la cual deberá incluir un diagrama de los dispositivos utilizados para evaluar el comportamiento de las obras y de su área de influencia, durante las fases de construcción, puesta en carga y operación, cuando corresponda.

En esta misma norma en el artículo 20, se establece la obligatoriedad de elaborar un sistema coordinado de control y monitoreo, el cual debe tomar como base el análisis indicado en el artículo 18 del presente Reglamento, orientado a la verificación de la seguridad y a determinar el estado de funcionamiento de la obra. Para embalses de relevés e industriales, adicionalmente, se deberá presentar, además, el registro y control de caudales de recirculación. La información derivada del sistema de control y monitoreo deberá estar disponible en todo momento para la evaluación de la Dirección, pudiendo ésta requerir al Titular de la obra la confección de informes con el registro y análisis de las variables controladas. Adicionalmente, para los embalses de Categorías B y C, se deberá elaborar un **informe anual** que recogerá los resultados de la **inspección y auscultación** de estas obras, donde se indiquen las anomalías observadas y se propongan las acciones correctivas correspondientes. Esta documentación deberá incluirse como parte de la información técnica de la obra, de conformidad con lo indicado en la letra i) del presente artículo”.

Por último, en el artículo 26 se establecen las variables mínimas a monitorear para las obras hidráulicas establecidas en el artículo 294 del referido texto legal, siendo éstas el caudal porteado por las obras de atravesado, los asentamientos y los desplazamientos.



Tipo Norma	:Decreto 50
Fecha Publicación	:19-12-2015
Fecha Promulgación	:13-01-2015
Organismo	:MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
Título	:APRUEBA REGLAMENTO A QUE SE REFIERE EL ARTÍCULO 295 INCISO 2°, DEL CÓDIGO DE AGUAS, ESTABLECIENDO LAS CONDICIONES TÉCNICAS QUE DEBERÁN CUMPLIRSE EN EL PROYECTO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS IDENTIFICADAS EN EL ARTÍCULO 294 DEL REFERIDO TEXTO LEGAL
Tipo Versión	:Única De : 19-12-2015
Inicio Vigencia	:19-12-2015
Id Norma	:1085618
URL	: https://www.leychile.cl/N?i=1085618&f=2015-12-19&p=

Figura 17: Ficha técnica Decreto 50. Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

4. ESTUDIOS PREVIOS

En los últimos años, el aprovechamiento del recurso hídrico ha desempeñado un papel fundamental para el desarrollo del país, ya que para garantizar un desarrollo social y productivo sostenible se necesitan obras de regulación que acumulen agua para los periodos de escasez.

En el siglo XIX, el recurso hídrico fue el protagonista del avance en la producción agrícola, ya que permitió un gran crecimiento de las superficies de riego, de manera que actualmente 8 de cada 10 litros de agua que se consumen en el país atienden a necesidades de regadío. Por el contrario, pese a la gran importancia de este recurso, aun existen zonas en el país que no pueden acceder a este recurso tan básico, las zonas rurales. En ellas, donde son abastecidos 2.100.000 habitantes, 250.000 personas no tienen agua potable y 700.000 no disponen ni de saneamiento ni de servicios sanitarios mínimos.

De acuerdo a los niveles de escasez y disponibilidad de agua, resulta evidente la necesidad de que el desarrollo de la infraestructura hídrica se centre en la construcción de obras de regulación y la modernización de los sistemas de canales de riego, donde claramente Chile se encuentra retrasado con respecto a los países más desarrollados. Las infraestructuras de almacenamiento de agua, presentan una relevancia crucial en la nivelación entre la oferta y la demanda hídrica. La disposición de este recurso presenta especial importancia en los rubros de la industria agrícola, energética, minera y para el consumo humano.

Realizando un análisis global, destaca como región más comprometida en cuanto a la baja disponibilidad de agua debido a la sequía que afecta al país la de la RM al norte, en la que en localidades como Arica, Copiapó, Tocopilla, Limarí, Choapa y Petorca la situación es crítica.

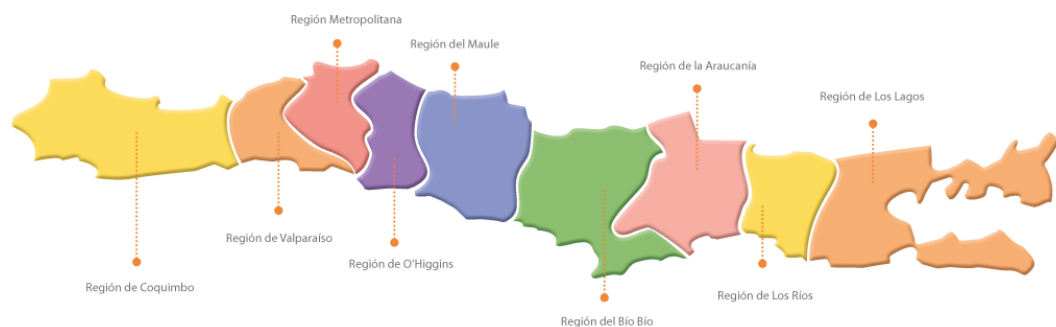


Figura 18: Esquema regiones chilenas. Fuente: imágenes de google.

En el territorio chileno, disponer de esta infraestructura es determinante para el desarrollo de la nación. El país presenta en su mayoría una orografía irregular con grandes diferencias de altura en cortas distancias, asimismo, en referencia a la climatología y, en concreto al régimen de precipitaciones, se produce de manera intensiva y breve. Ambos factores combinados

disponen un potencial elevado de escurrimiento y desaprovechamiento de los recursos hídricos disponibles.

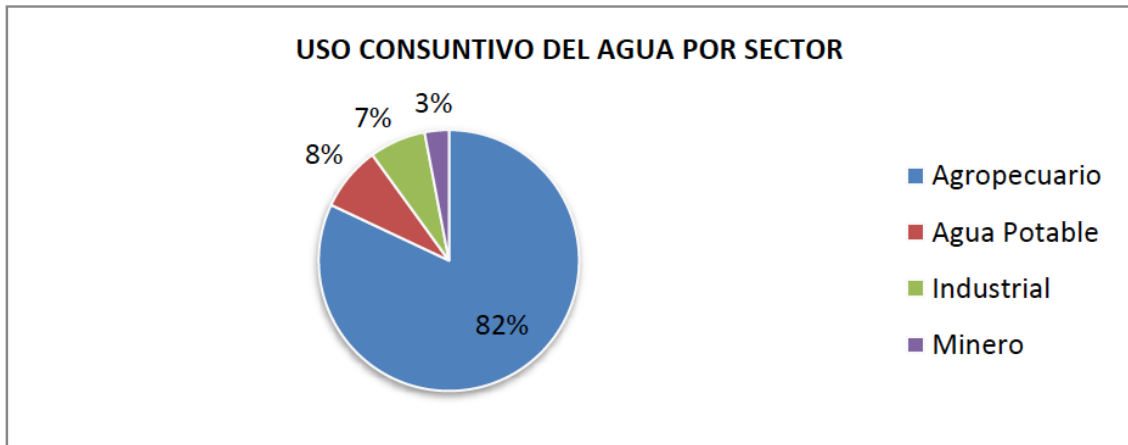


Figura 19: Gráfico uso del agua por sector en Chile. Fuente: Comité Nacional Chileno de Grandes Presas.

El Gobierno de Chile, consciente del factor estratégico para el desarrollo que constituye la disponibilidad de presas, se encuentra inmerso en un plan de inversiones en el mantenimiento y la construcción de esta infraestructura a través de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Además, la mayoría de grandes presas están construidas con materiales sueltos, de las 92 presas de mayor tamaño del país, solo 12 siguen los principios de construcción de hormigón en gravedad o en arco (Aproximadamente el 90% de las presas es de materiales sueltos).

De entre la totalidad de presas de materiales sueltos, actualmente sólo existen **3 presas monitorizadas**, concretamente, las presas **Ancoa, El Bato y Corrales**. La razón se ha expuesto anteriormente, y está directamente relacionada con el año de construcción de las mismas, siendo la mayoría de ellas anteriores a 2015 (como es el embalse de Chacrillas) por lo que no han sido afectadas por la ley (decreto 50) que obliga a realizar estas labores.

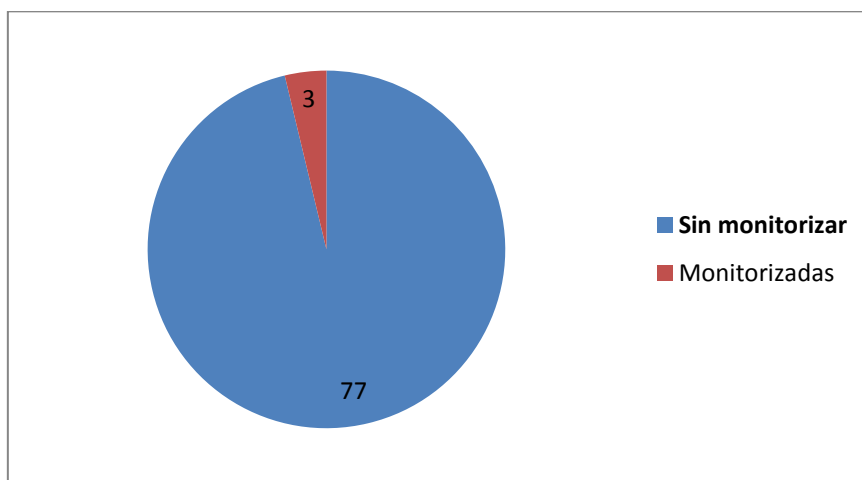


Figura 20: Monitorización en presas de materiales sueltos chilenas. Fuente: Comité Nacional Chileno de Grandes Presas.

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

En la tabla anexa se sintetizan las presas de materiales sueltos no instrumentadas por periodo de construcción.

GRANDES PRESAS DE MATERIALES SUETOS EN CHILE (CLASIFICADAS POR PERIODO DE CONSTRUCCIÓN)						
Construidas hasta 1926	Periodo 1930-1936	Periodo 1937-1956	Periodo 1957-1967	Periodo 1968- 1977	Periodo 1981-1986	Periodo 1987 - 1999
Catapilco	Huelehueico	La Laguna	La Dehesa	Digua	Coihues A	Aromos
San Alfonso	Orozco	Lolol	Laguna del Maule	Sapos	Coihues B	El Indio
Peñuelas	Pitama	Cogotí	Tucapel	El Melón	Coihues C	Austral
El Sauce	Purísima	Lautaro	La Invernada	Coihueco	Los Leones	Melado
Lliu-Lliu	Huechún	La Marquesa	Parrón	El Mollar	El cobre	Los Bronces
El Sauce	Lo Ovalle	El Sauce	Los Nabos	Vega Larga	Colbún	Convento Viejo
La Marquesa de los Quillayes	Los Perales de Tapihue	Sauzal	Puerta Colorada	Cauquenes n°3	El Colorado	Candelaria
La Dehesa	Culimo	Bullileo	Rungue	Cauquenes n°4	Centinela	Santa Juana
Las Palmas de Quilpué	Recoleta	Tutuvén	San Rafael	Conchi	Machicura	Puclaro
Alcones	Caritaya	Laguna del Planchón	Las Mercedes	Barahona n°3	Secundaria	
Carrizal	Cerrillos	Las Piedras	Paloma	Los Cristales	Carén	
			El Yeso			

Tabla 4: Grandes presas de materiales sueltos en Chile clasificadas por periodo de construcción. Fuente: Comité Nacional Chileno de Grandes Presas.

Centrándonos en el **embalse de Ancoa**, éste presenta un sistema de monitoreo muy completo que nos puede ayudar a entender la tendencia que está siguiendo el país y la importancia que se le comienza a dar a la implementación de estos sistemas.

Este nuevo embalse, denominado Embalse Ancoa, se ubica en una angostura del río Ancoa, ubicada en el sector del puente La Selva. Se trata de una presa a base de rellenos de gravas gruesas con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba.

Centrándonos en la instrumentación, el comportamiento físico del material de relleno de la presa y su base fluvial junto con el empotramiento e impermeabilidad de la pantalla se mide y controla mediante instrumentos geotécnicos, que se numeran a continuación:

- 3 Piezómetros eléctricos.
- 11 Medidores triaxiales deformación del hormigón.
- 9 Medidores de Juntas.
- 8 Medidores de temperatura.
- 38 Puntos de control de nivelación.
- 28 Asentímetros eléctricos.
- 4 Acelerógrafos triaxiales para medir desplazamientos fuertes, alineados respecto a ejes principales de la presa.
- 45 Reglas limnimétricas de dos metros cada una.
- Medidor continuo de nivel del embalse.

- 3 Piezómetros Casagrande.

Estos instrumentos son de tecnología cuerda vibrante y cada medida local realizada por un sensor es transformada en una señal eléctrica, la que es conducida mediante un cable apropiado a un tablero de conexiones instalado en una caseta construida en la zona de coronamiento. Los datos son administrados por un software dedicado que opera dentro de un computador, que los interpreta y despliega en una pantalla como variables físicas.

La DOH se encuentra en curso de instalar un terminal inteligente en la caseta de instrumentación, que realizará una lectura en forma programada de los datos provenientes de cada sensor de cuerda vibrante. Esto es debido a que se quiere transmitir la información disponible en la sala de instrumentos hasta el equipo de telecontrol centralizado ubicado en las oficinas de administración.

5. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL

5.1. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El embalse de Chacrillas es un cuerpo de agua artificial ubicado a 16 km al nororiente de la ciudad de Putaendo (V Región de Valparaíso, provincia de San Felipe de Aconcagua) que fue inaugurado el 26 de Enero de 2018. Este embalse, cuya construcción se inició en el año 2011 y que contempló una inversión de más de 69 mil millones de pesos (91.247.763 euros) almacena recursos hídricos excedentarios del río Rocín, afluente del río que comparte nombre con la comuna, el río Putaendo. Su línea de coronación está situada en las coordenadas UTM que se exponen a continuación:

NORTE	SUR
6.403.115,530	354.221,770
6.402.810,112	354.113,245

Tabla 5: Coordenadas UTM de la línea de coronación del Embalse de Chacrillas (Datum Psad 56, Huso 19). Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

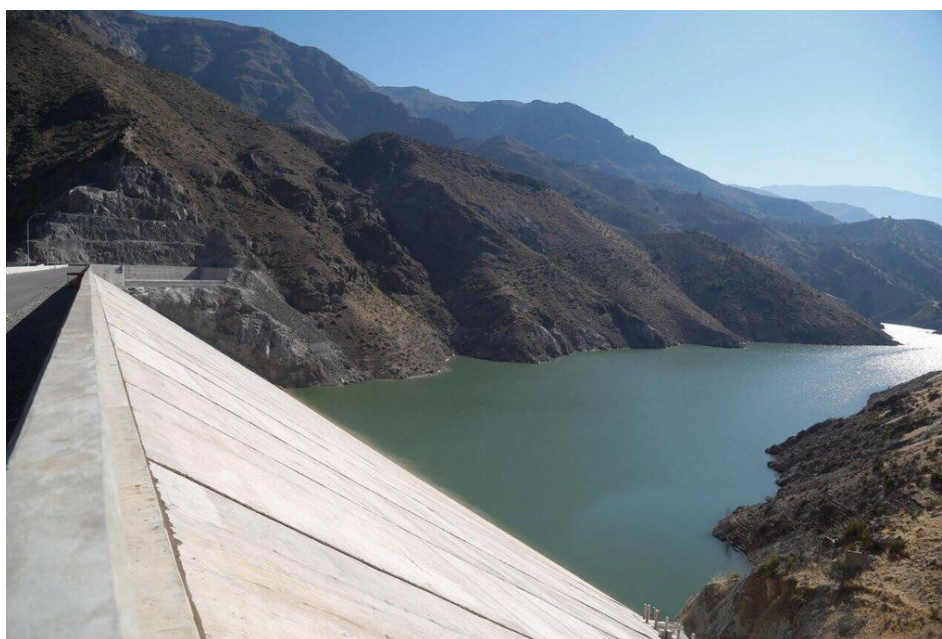


Figura 21: Fotografía del estado actual del Embalse de Chacrillas. Fuente: fotografías realizadas durante la visita.

En cuanto a la tipología de su construcción, está constituida por un muro de tipo CFRD (presa de gravas con pantalla de hormigón) constituida mayoritariamente con los materiales provenientes de las excavaciones que se llevaron a cabo durante el proceso de construcción y de aluviales gruesos permeables que se obtuvieron de la zona de empréstitos localizada en el sector del Estero Chalaco aguas arriba de la confluencia con el río Rocín, a 2.5 km del lugar de emplazamiento del muro. También se utilizaron aluviales gruesos permeables que se obtuvieron del empréstito localizado en el Estero Chalango aguas arriba de la confluencia con el río Rocin, situado exactamente a 2.5 kilómetros del lugar de emplazamiento del muro. La cantidad aproximada de material que fue utilizado ronda la cifra de 2.500.000 m³.

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

Este embalse fue construido bajo la Ley de Riego 1123, en la cual el estado subsidia alrededor del 80 por ciento y el resto del coste es asumido por los regantes en un plazo cercano a los 20 años.

El valle del río Putaendo, ubicado 115 km al norte de Santiago, tiene recursos de suelo y clima que permiten obtener una alta rentabilidad de la actividad agropecuaria. En efecto, dichos recursos facilitan la producción de fruta para exportación y consumo interno del país, lo que ha incentivado en los últimos años el desarrollo de estos rubros. Sin embargo, el aprovechamiento eficiente de estos recursos se ha visto frenado por la poca seguridad de disponer oportunamente de aguas para riego, derivada de la insuficiente regulación del río Putaendo. El río Putaendo está formado por los ríos Chalaco y Rocín, este último recibe al río Hidalgo como afluente. Ninguno de los nombrados cuenta con regulación y por lo tanto no se puede asegurar el riego del valle Putaendo. Por esta razón, el objetivo principal del proyecto fue optimizar el regadío en el valle de Putaendo, en el cual anteriormente se regaban con una seguridad inferior al 50% 6.000 hectáreas aproximadamente, y con la construcción del embalse se ha logrado incrementar dicha seguridad a un 85%, además se incorporarían 1.100 nuevas hectáreas.



Figura 22: Mapa de situación de la zona de riego del Embalse de Chacrillas. Fuente: Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

En cuanto a sus características principales, cuenta con un lago artificial de 92 hectáreas y una capacidad útil de 27 millones de metros cúbicos de aguas. La altura de coronación de la presa es de 102, 5 metros y la longitud de su coronamiento tiene 320 metros. La tipología del vertedero es no controlado y dispone de una capacidad de descarga máxima de 1.135 m³.

A continuación se expone unas tablas con las características principales según el directorio del comité nacional chileno de grandes presas (ICOLD Chile):

DATOS GENERALES	
Ubicación	V Región
Ciudad más cercana	Putendo
Río	Rocín
Propietario	Dirección de Obras Hidráulicas
Año de termino	2018
Propósito	EDIC Ingenieros S.A,
Ingeniería	2 colores
Constructor	Obrascon Huarte Laln S.A.

Tabla 6: Datos generales del Embalse de Chacrillas. Fuente: ICOLD Chile.

CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA	
Tipo	Enrocado
Fundación	Roca/Suelo
Altura máxima (m)	103
Longitud de coronamiento (m)	319
Volumen (m³)	2.450.000
Elemento de sellado	Cara concreto
Cota coronamiento	1.338 m.s.n.m
Cota de fundación plinto	1233 m.s.n.m
Ancho de coronamiento (m)	10
Talud aguas arriba (H : V)	1,5/1
Talud aguas abajo (H : V)	1,65/1

Tabla 7: Características técnicas de la presa. Fuente: ICOLD Chile.

CARACTERÍSTICAS VERTEDERO	
Tipo	Creager (No controlado)
Capacidad máxima de descarga (m³)	1.135
Cota	1.332 m.s.n.m
Fundación	Roca
Longitud	55 m (punto más alto)

Tabla 8: Características técnicas del vertedero. Fuente: ICOLD Chile.

CARACTERÍSTICAS EMBALSE	
Área (m ²)	930.000
Capacidad (m ³)	31.400.000
Volumen de regulación (m ³)	27.000.000
Nivel aguas máximo	1337 m.s.n.m
Nivel de aguas mínimo	1264 m.s.n.m

Tabla 9: Características del embalse. Fuente: ICOLD Chile.

En abril de 2015 se finalizó la construcción del muro, obra principal del embalse. Con ello, ya se permitiría iniciar los llenados de prueba, poniéndose también a prueba el servicio de la presa. En junio de 2015, y con la presencia del Ministro de Obras Públicas y de Agricultura, se cerraron las compuertas y se dio inicio al llenado de embalse.

Para julio de 2015, sólo 300 mil metros cúbicos había acumulados en el embalse, pero pese a ello, el almacenamiento debió detenerse para efectuar trabajos de impermeabilización en los costados del muro y en su unión con las rocas de los cerros donde se encuentra emplazado. La detención causó alarma entre los agricultores y autoridades de la zona, quienes manifestaron temor por futuras demoras en las obras pendientes.

5.2. MATERIALES QUE CONFORMAN LA PRESA

La sección transversal del muro de presa está constituida por distintos tipos de relleno, los que se describen y justifican brevemente en lo que sigue:

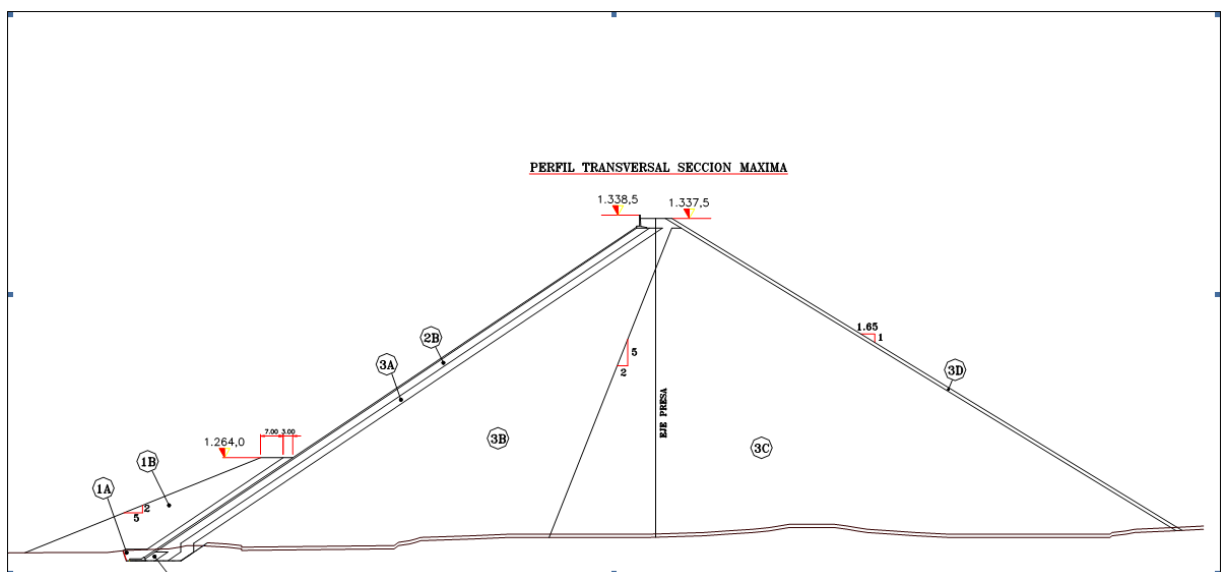


Figura 23: Esquema materiales que conforman la presa. Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

- **Rellenos tipo 1A:** Son rellenos impermeables constituidos por finos de escasa plasticidad, provenientes de los depósitos de relaves de la mina El Arenal, dispuestos aguas arriba de la pantalla bajo la cota 1.264 m.s.n.m. Estos rellenos, que tienen un ancho de 3,0 m y descienden hasta el terreno natural con una pendiente de 1,5:1 (H: V), tienen por finalidad sellar fugas de agua que puedan producirse en la parte baja de la pantalla de hormigón, zona que normalmente estará bajo agua y por ende resulta más difícil de inspeccionar y reparar sin causar alteraciones en la entrega para riego.
- **Rellenos tipo 1B:** Son rellenos semipermeables formados por gravas y arenas limosas provenientes del yacimiento aluvial del Chalaco, dispuestos inmediatamente aguas arriba de los rellenos tipo 1A y que tienen por finalidad protegerlos contra la erosión y darle confinamiento al conjunto de rellenos tipo 1. Estos rellenos en el coronamiento tienen un ancho de 7,0 m y caen hasta el terreno natural con un talud de 2:5 (V:H).
- **Rellenos tipo 2A:** Son rellenos de arenas que se obtuvieron por tamizado del yacimiento del cauce del Chalaco. Están dispuestos inmediatamente aguas abajo del plinto. Estos rellenos, que tienen un tamaño máximo dado por la malla #4, cumplen la función de ser filtro de los rellenos 1A, de manera que en caso de producirse filtraciones, retengan al material fino que constituye los rellenos 1A.
- **Rellenos tipo 2B:** Son rellenos de gravas arenosas, preparadas en planta con materiales provenientes del yacimiento del cauce del Chalaco cortados en 3", sobre los que se apoya la pantalla de hormigón. La función de estos rellenos es darle a la pantalla una superficie de apoyo lisa, homogénea y estable. Además es un relleno más impermeable que los que se disponen aguas abajo y por lo tanto puede controlar el flujo de filtraciones a valores razonables si se produce una falla de la pantalla.
- **Rellenos tipo 3A:** Son rellenos de gravas arenosas provenientes del cauce del estero Chalaco, eliminando toda piedra mayor a 6". Este relleno constituye una transición entre el 2B y el 3B, permitiendo que el relleno 2B trabaje como un material que controle flujo si se producen fallas en la pantalla.
- **Rellenos tipo 3B:** Son rellenos constituidos por gravas provenientes del yacimiento del cauce del estero Chalaco, sin tratamiento y del yacimiento de la terraza aluvial de la ribera derecha del Estero Chalaco, colocadas en capas de 90 cm de espesor que se compactaron por medio de 4 pasadas de rodillo liso vibratorio de más de 10 ton de peso. Estos rellenos constituyen una parte importante del muro de presa, por lo que deben tener un buen grado de compactación, a fin de reducir al máximo las deformaciones de la pantalla cuando se vea sometida a la carga del agua.
- **Rellenos tipo 3C:** Son rellenos constituidos por material extraído del yacimiento de la terraza aluvial de la ribera derecha del Chalaco. Además, se constituyen por los materiales provenientes de excavaciones de roca sana (túnel y vertedero). Estos

rellenos se colocaron en capas de 120 cm de espesor y fueron compactados por medio de 4 pasadas de rodillo liso vibratorio de más de 10 ton de peso. Estos rellenos son los más abundantes de la presa y se disponen en el sector de aguas abajo de ésta.



Figura 24: Fotografía del material que conforma el talud de aguas abajo. Fuente: fotografías realizadas durante la visita.

- **Rellenos tipo 3D:** Son rellenos constituidos por bolones, correspondientes al rechazo obtenido de la preparación de los materiales para los rellenos tipo 2 y tipo 3A. Estos rellenos, que tienen un ancho variable entre 1 y 3 m, actúan como protección del talud de aguas abajo y además le confieren al muro un muy buen aspecto.
- **Pantalla de hormigón:** su espesor es variable linealmente, desde 30 cm hasta 50 cm. Su máxima longitud horizontal es de 319 m. Se divide en 21 paños de losa de 15 metros de ancho, más un paño de ancho menor que se ubica en el extremo derecho del coronamiento. De acuerdo a lo anterior, la pantalla tiene juntas verticales cada 15 m.



Figura 25: Fotografía del material que conforma el talud de aguas arriba. Fuente: fotografías realizadas durante la visita.

5.3. OBRAS ANEXAS

5.3.1. EVACUADOR DE CRECIDAS

Las obras de evacuación de crecidas se ubican al lado norte del río, próximas al empotramiento derecho de la presa. El evacuador de crecidas está constituido por un vertedero de cresta libre, sin compuertas, de modo que la altura umbral del vertedero fija la cota máxima normal de operación del embalse. El muro vertedero conforma el costado de un canal colector de ancho y profundidad variables. Las aguas que vierten libremente sobre el muro, se descargan en el canal colector que conduce, a través de una zona de transición, hasta un rápido de descarga que termina en un lanzador.

El vertedero tiene un perfil Creager, está ubicado en la cota 1.332 m.s.n.m y tiene una longitud total de 55 m en su punto más alto. Es de hormigón armado y está fundado en roca en toda su longitud.



Figura 26: Fotografía evacuador de crecidas (1). Fuente: fotografías realizadas durante la visita.



Figura 27: Fotografía evacuador de crecidas (2). Fuente: fotografías realizadas durante la visita.

5.3.2. TÚNEL DE DESVÍO

El túnel se ubica en el lado derecho del río y tiene una longitud cercana a los 400 m. El tramo comprendido entre el portal de entrada y la caverna de válvulas es de aproximadamente 202 m de longitud y tiene una sección de medio punto interior de 4,4 m de base, 4,4 m de ancho y 2,2 m de radio.

Ha sido diseñado para evacuar una crecida de 25 años de período de retorno que tiene un caudal máximo instantáneo de 113 m³/s. Su longitud será del orden de los 550 m, de los cuales 400 corresponden a una excavación subterránea y el resto a tajo abierto. Bajo estas condiciones, el tramo del túnel ubicado aguas arriba de la caverna de válvulas, funcionará en presión al igual que el desvío dentro de la misma caverna.

Para la derivación de las aguas hacia el túnel de desvío, se construirá una ataguía de una altura cercana a los 10 m, cuyo eje se ubicará a unos 40 m aguas arriba del pie de la presa.



Figura 28: Fotografía túnel de desvío (1). Fuente: fotografías realizadas durante la visita.



Figura 29: Fotografía túnel de desvío (2). Fuente: fotografías realizadas durante la visita.

5.3.3. OBRAS DE TOMA, CONDUCCIÓN, ENTREGA U DESAGÜE DE FONDO

La captación, conducción y entrega de los recursos hídricos para riego, se hará a través del túnel de desvío, maximizando su aprovechamiento. Para ello se construirá una torre de captación a la entrada del túnel de desvío, una cámara de válvulas ubicada aproximadamente a 200 m aguas abajo de la entrada del túnel y una tubería desde la cámara de válvulas hasta la obra de entrega al río.

- **Obra de toma:** la torre de toma, ubicada en la entrada del túnel de desvío, captará agua para riego y para el desagüe de fondo.

Durante el período de desvío del río para la construcción de la presa, la torre estuvo abierta en su parte frontal para permitir la pasada del agua. Una vez terminado el período de desvío se cerró el frente de la torre por medio de 2 compuertas, de modo que el agua para riego entra a la torre por las aberturas superiores, impidiendo la entrada del sedimento que se acumulará en el embalse.

La torre es una estructura de hormigón armado, tiene su radier al mismo nivel que el piso del túnel, en la cota 1.242,35 m.s.n.m. y su máxima altura es de 14,25 m. El umbral de las aberturas superiores se ubica a la cota 1.253,10 m.s.n.m.

- **Caverna de Válvulas:** la caverna de válvulas está ubicada prácticamente bajo el eje de la presa y del vertedero, de tal forma que entre las inyecciones de ella, del vertedero y del plinto en ese sector, conforman una cortina impermeable. La caverna es completamente revestida en hormigón armado y tiene una longitud de 30 m, precedida por una transición de 12 m. Además, tiene una sección de medio punto de 11 m de altura, 11 m de ancho y un radio de 5,5 m (dimensiones de la excavación teórica).

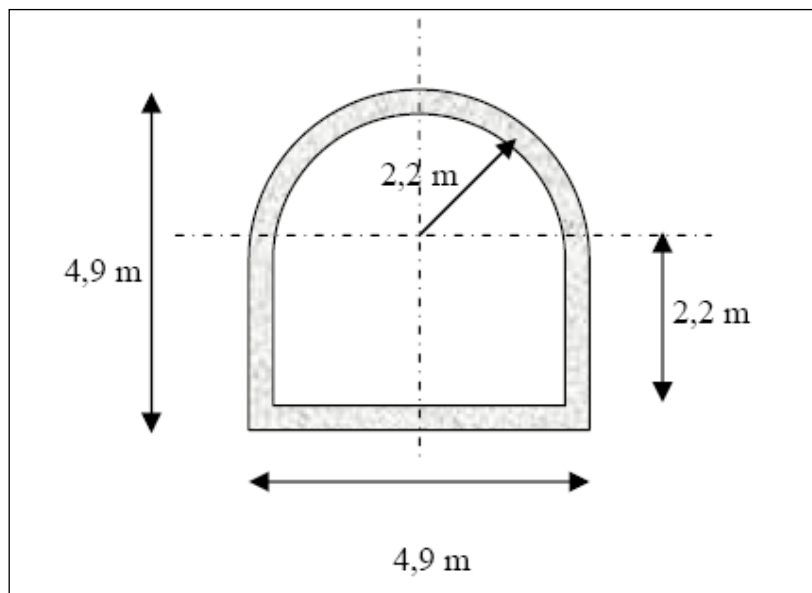


Figura 30: Sección tipo, tramo aguas arriba de la Caverna de Válvulas. Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

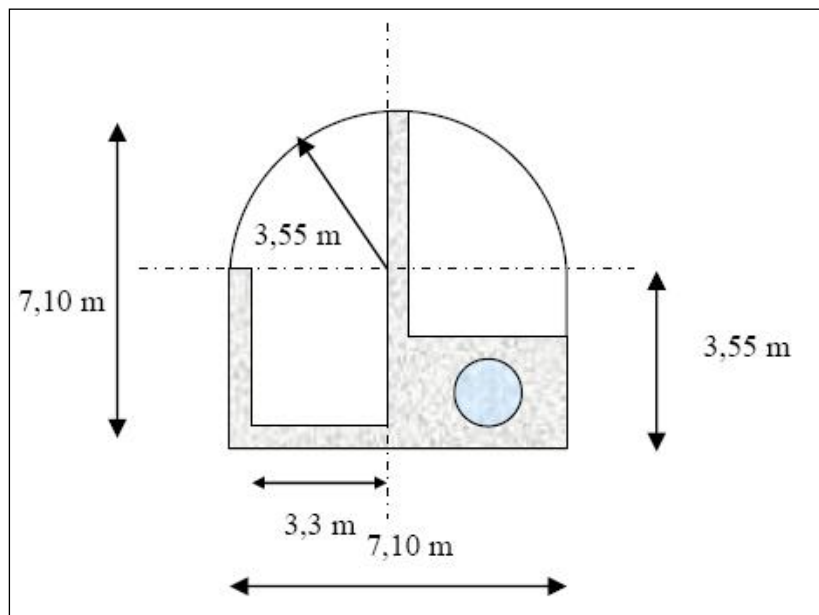


Figura 31: Sección tipo, tramo aguas abajo de la Caverna de Válvulas. Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

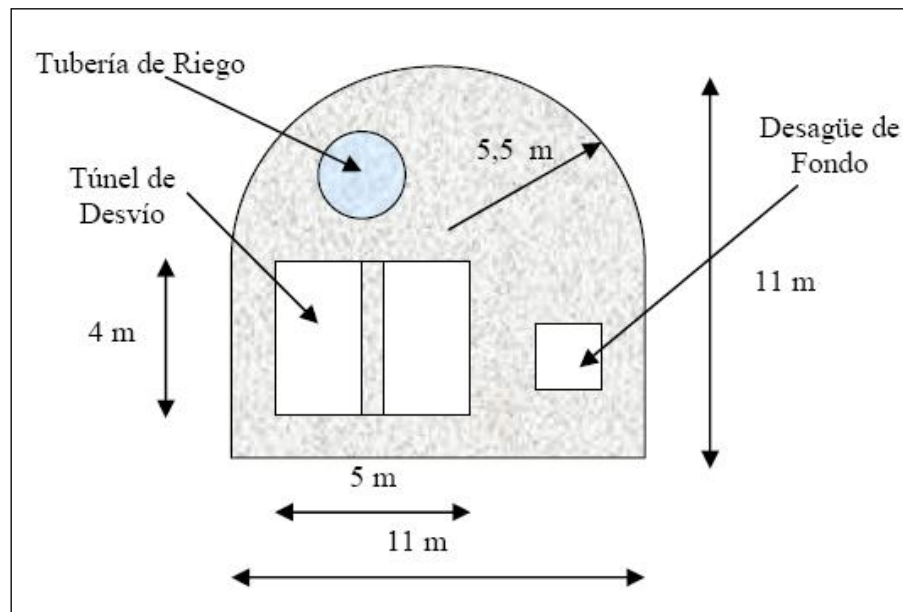


Figura 32: Sección Caverna de Válvulas (Sector tapón). Fuente: proyecto construcción Embalse de Chacrillas.

- **Desagüe de fondo:** las compuertas de desagüe de fondo tendrán 1,2 m de altura y 1,0 m de ancho. Con estas dimensiones el desagüe de fondo permite vaciar el embalse en un plazo de aproximadamente 17 días, operando en conjunto con las obras de entrega a riego y considerando un caudal afluente permanente de $20 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde aproximadamente al mayor caudal medio mensual afluente al embalse.

5.4. AUSCULTACIÓN ACTUAL

El embalse de Chacrillas, como hemos comentado anteriormente, es una de las últimas presas de materiales sueltos que se han construido en el país. Esta es la razón principal por la que en el momento de su construcción se tuvo en cuenta la importancia de auscultar este tipo de infraestructuras. Aun así, los sistemas instalados son muy rudimentarios, muy lejos de ser capaces de constituir un sistema realmente completo.

Por ello, en el embalse de Chacrillas no partimos de una auscultación nula, ya que se están utilizando celdas de presión hidráulica y monolitos de control para medir los asentamientos y desplazamientos del terreno; y piezómetros de casagrande para medir las presiones intersticiales. Estos sistemas se pueden catalogar como rudimentarios, existiendo otros métodos, como bien hemos explicado anteriormente, que presentan una mayor precisión y una mayor facilidad para monitorear los datos obtenidos.

A continuación, se explican de manera técnica los sistemas nombrados:

- **Monolitos de control:** dispuestos a lo largo de toda la presa para realizar mediciones periódicas de forma manual. Hacen un total de 51 monolitos distribuidos en 7 líneas. Gracias a ellos, conocemos de que manera asienta el terreno y del diferente desplazamiento del terreno que se producen a lo largo de la vida útil de la infraestructura.

La principal desventaja de este sistema de auscultación es la necesidad de que un operario tenga que acudir a la presa de forma periódica cada vez que se necesiten medir los asientos producidos, ya que el procedimiento actual consiste en comparar las diferentes mediciones que se realizan a lo largo del tiempo, realizadas manualmente con un equipo topográfico. No es posible automatizar las mediciones de asientos a través de los monolitos de control, pero si será posible hacerlo gracias a las celdas de presión hidráulicas (Se desarrolla en el Anejo nº 4).

- **Celdas de presión hidráulicas (celdas de agua):** están divididas en tres niveles y hacen un total de (12 en el primer nivel, 8 en el segundo y 4 en el tercero). Se utilizan para medir los asientos del terreno a partir de los cambios de presión de cada una de las células. Actualmente estas mediciones se realizan manualmente, por lo que el objetivo será monitorizar estos sensores (desarrollado en el Anejo nº 4 y nº 5).
- **Piezómetros de casagrande:** son pozos de monitoreo que sirven para medir el nivel piezométrico del agua subterránea o nivel freático y se basan en el principio de diferencia de presiones del agua dentro de un terreno.

Estos piezómetros consisten en perforaciones o sondeos que atraviesan el nivel freático seguido por la inserción de un revestimiento de PVC de 2" de diámetro, ranuradas en el fondo para que pueda ingresar el agua subterránea que se requiere medir y se coloca un filtro de arena alrededor de la tubería. Existen un total de 7 distribuidos por toda la presa (Ver planos en Documento nº 2).

De la misma forma que en las celdas de presión hidráulicas, actualmente las mediciones se realizan de forma manual por lo que el objetivo será monitorizar estos sensores (desarrollado en el Anejo nº 4 y nº 5).

6. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS Y ELEMENTOS A INSTALAR.

6.1. VARIABLES QUE TENDRÁ EN CUENTA NUESTRO SISTEMA.

Para comenzar, se expondrán las variables que tendremos en cuenta con nuestro sistema de monitorización y se justificarán las principales razones por las que resulta imprescindible que estén incluidas.

- **Presiones hidráulicas:**

Los pliegos de condiciones suelen ser exigentes, y entre las características que deben cumplir los materiales de construcción utilizados en el núcleo, la humedad de compactación ocupa un papel muy importante. Este factor influye de manera considerable en la deformabilidad y en la resistencia, pues en el caso de excesiva humedad aparecen presiones intersticiales altas durante la construcción, y en el caso de que se compacte un suelo excesivamente seco pueden aparecer importantes asientos al saturarse.

Por esta razón, unas de las variables que deberemos auscultar en nuestras presas de materiales sueltos son las presiones intersticiales y las presiones totales.

Concretamente, la razón por la cual es imprescindible incluir la medición de las presiones totales es que aunque en los cálculos de estabilidad o de asientos, se admite que la presión total ejercida en un punto es $H \times \gamma$ (siendo H la altura y γ el peso específico del material empleado); en realidad, no conocemos cual es, pues el peso específico del material empleado varía con el tiempo y con el modo de compactación. Por ello, y cuando el coeficiente de seguridad sea pequeño, es muy recomendable realizar las comprobaciones necesarias en presiones efectivas partiendo de las presiones intersticiales y totales medidas in situ.

- **Asientos:**

Es sabido que la mayoría de los accidentes en presas se dieron por fenómenos de agrietamiento del elemento impermeabilizante. Por ello, es importante controlar este posible agrietamiento tomando las medidas oportunas a medida que la presa se va construyendo. Como en la creación de grietas los asientos diferenciales juegan un papel muy importante, y en ellos puede influir la comprensibilidad de la cimentación, es claro que ella ha de tenerse en cuenta durante la ejecución del proyecto y medirla durante la construcción y explotación, si es necesario.

- **Temperatura:**

La temperatura en el cuerpo de la presa y en su cimentación suelen ser diferentes a la medida en el embalse. Es bien sabido que en el caso de que se produzca una filtración con origen en el embalse, no solo se efectuará un transporte del agua sino también una transmisión de calor por convección del agua a la presa. Con una velocidad de flujo de desde 10^{-6} m/s hasta 10^{-7}

m/s, el transporte térmico advectivo sobrepasa el porcentaje conductivo. De esta manera, la distribución de temperatura en la zona de la filtración se adapta a la del agua. A través de la medición de este cambio térmico se pueden detectar las filtraciones usando el agua como trazador.

- **Filtraciones:**

Como ya se ha comentado, la aparición de filtraciones en una presa de materiales sueltos es uno de los problemas que peores consecuencias pueden desencadenar. Hoy en día resulta imprescindible controlar de forma efectiva la ubicación y aparición de estas, con el objetivo de mitigarlas de la forma más temprana y eficaz posible.

- **Fisuración:**

Este tema ya ha sido tratado en el segundo apartado de los antecedentes, en el que comentábamos los principales fallos que se dan en las presas de materiales sueltos. En este decíamos que la fisuración es un problema que afecta a las presas que están formadas por suelos cohesivos (fundamentalmente núcleos), las que no tienen este tipo de material no forman fisuras. En nuestro caso, el elemento impermeabilizante del Embalse de Chacrillas no lo materializa el núcleo, sino que se consigue a través de una cara de concreto situada en el talud de aguas arriba, por lo que el estudio de la fisuración se centrará en este elemento.

- **Vibraciones del terreno:**

Debido a la gran presencia sísmica en el territorio chileno, la medición de las aceleraciones que se producen en el terreno será uno de los puntos más importantes en el sistema de auscultación. Estas aceleraciones no se desencadenan únicamente debido a la presencia de un sismo, sino que también habrá que tener en cuenta pequeñas fuentes de emisión como pudiera ser el paso de un vehículo de mantenimiento por uno de los caminos situados en las inmediaciones de la infraestructura.

El principal problema que acarrea la aparición de aceleraciones en una presa de materiales sueltos es la licuefacción. Este fenómeno describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado.

En el caso de las presas de materiales sueltos este fenómeno presenta una susceptibilidad máxima cuando estamos ante un terreno fino con un alto grado de saturación, en el que debido a una acción sísmica las partículas se “acoplan” entre ellas haciendo que el agua ascienda arrastrando al grano de más finura. Esto produce el fenómeno que anteriormente comentábamos en el que el terreno pierde la totalidad de su consistencia y se comporta como un fluido.

Para prever su aparición, es muy importante tener bien controladas tanto la presión intersticial del terreno como el riesgo de aparición de un fenómeno sísmico.

6.2. SENSÓRICA A INSTALAR

La tipología, el número y las especificaciones técnicas de los sensores que se proponen instalar en el embalse de Chacrillas son los siguientes:

- **Limnómetro:** es un sensor que se encargará de medir el nivel del agua del embalse. Su instalación es muy simple, ya que tiene el mismo funcionamiento que un piezómetro de casagrande, pero sin necesidad de estar enterrado para realizar las mediciones.

En cuanto a su procedimiento de colocación, bastará con dejarlo colgando sobre su propio cable sobre el parámetro de aguas arriba, de manera que se asegure que con el nivel mínimo del embalse este sumergido para realizar las mediciones. Para ello, se colocará a una cota de 1260 m.s.n.m asegurando su continuo funcionamiento. Es importante que el sensor este fijado de alguna manera al paramento de hormigón para que este no se mueva y no de lecturas erróneas.

El sensor elegido es un registrador de nivel de agua (WWL) de la marca Sisgeo. El WWL es un sistema integrado diseñado para el control automático y continuo del nivel de agua dentro de pozos, piezómetros abiertos y piezómetros de Casagrande, pero también puede ser utilizado para superficies de agua superiores como el nivel del embalse.

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	Registrador de nivel de agua WWL
Rango de temperatura	-20°C +50°C
Exactitud nivel de agua	±0.05% F.S.
Tipo de memoria	±0.5°C
Capacidad de memoria	No volátil
Intervalo de medida	64kbyte >21.000 medidas combinadas
Puerto de comunicaciones	Programable (min 1 s, máx. 18 horas)
Rango de temperatura operativa	-20°C +60°C

Tabla 10: Especificaciones técnicas registrador de nivel de agua WWL. Fuente: catálogo SISGEO.

- **Sensores de deformación (9 horizontales y 9 verticales):** están diseñados para ser colocados en la losa de hormigón con el objetivo de medir la expansión de las fisuras inducidas. Consisten de transductores de desplazamiento de cuerda vibrante ubicados en un tubo en PVC que contiene un borde de acero en cada extremo. Ambas partes están equipadas con tacos de expansión.

Para su instalación, los anclajes se atornillan en los lados opuestos de la junta o fisura y el transductor de desplazamiento alojado en el cuerpo del sensor se coloca de forma transversal a la fisura, permitiendo la medida de los cambios en la distancia entre los anclajes.

Los dos bordes están conectados a transductores de desplazamiento con el objetivo de convertir el desplazamiento axial del instrumento en una señal eléctrica legible y que pueda ser transmitida por el correspondiente sistema de comunicación.

De esta manera, serán instalados a lo largo de toda la cara de concreto situada aguas arriba de la presa, ya que al ser este el elemento impermeabilizante es muy importante tener controlados los posibles movimientos que se pudieran generar en este elemento.

Concretamente, el modelo específico seleccionado es el deformímetro de cuerda vibrante D233 de la marca Sisgeo, cuyas características principales se exponen a continuación:

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	D233 (SISGEO)
Rango de medida	0-150mm
Precisión	<±0.30 % FS
Rango de frecuencia típico	2250-3000 Hz
Temperatura de operación	-20°C +80°C
Dimensiones del tubo	Ø 48 mm, longitud 1000 mm
Material tubo	PVC
Tipo de protección	IP 68 hasta 1.0 Mpa.
Máxima distancia hasta el datalogger	1000m

Tabla 11: Especificaciones técnicas sensor de deformación D233. Fuente: catálogo SISGEO.

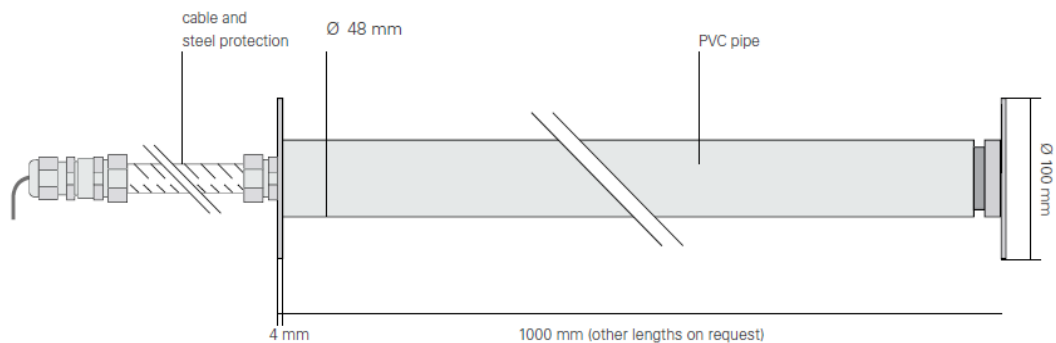


Figura 33: Esquema acotado sensor de deformación D233. Fuente: catálogo SISGEO.

- **Sensores de temperatura (9):** Utilizados para monitorizar la temperatura, parámetro muy importante para evaluar los efectos térmicos en diversos puntos de la presa. Es un termistor de 3 kΩ de resistencia nominal. Concretamente, el modelo es un termómetro OT111PT1000 con termistor RTD (detector térmicos resistivos) de la marca Sisgeo.

Los sensores térmicos RTD proporcionan mayor exactitud que los termistores y los termopares, que son las otras tipologías de sensores térmicos. El RTD se recorta en

fábrica con precisión mediante un útil de platino de 100 ohmios a 0 °C, lo que garantiza su estabilidad a largo plazo.

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	OT111PT1000 (SISGEO)
Rango de medida	-50°C +80°C
Resolución	0.1 °C
Precisión	±0.2 °C
Diámetro	20 mm
Longitud	100 mm
Material	acero inoxidable
Tipo de sensor	RTD

Tabla 12: Especificaciones técnicas sensor de temperatura OT111PT1000. Fuente: catálogo SISGEO.



Figura 34: Esquema acotado sensor de temperatura OT111PT1000. Fuente: catálogo SISGEO.

Para su instalación, el sensor se encuentra alojado en un cuerpo cilíndrico de acero inoxidable a prueba de golpes, apto para ser utilizado embebido al aire libre, sumergidos o embebidos en hormigón.

Para llevar a cabo su colocación, los sensores de medición se encajan primero en un varillaje de perforación hueco y con rosca hasta la profundidad en la que se desea medir. A continuación se introduce un cable en el varillaje que contiene varios sensores térmicos. Después de un breve momento de asimilación se miden simultáneamente las temperaturas del suelo en diferentes profundidades con un aparato de precisión portátil. Este sistema facilita poder detectar tanto los límites horizontales como los verticales de las filtraciones.

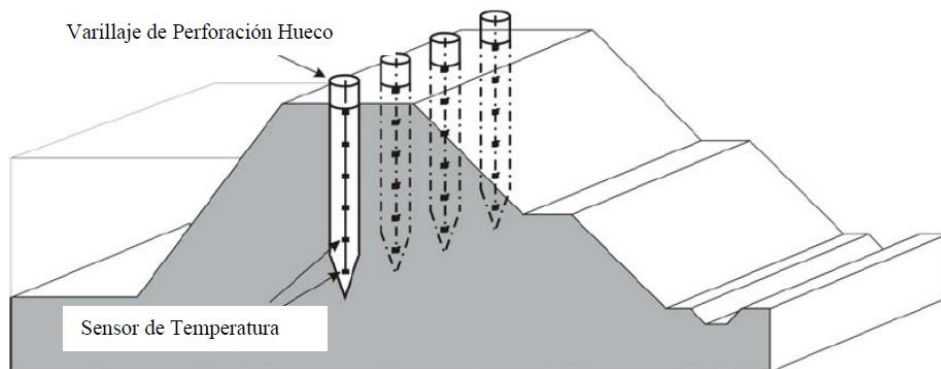


Figura 35: Esquema de la puesta en obra de los sensores de temperatura. Fuente: blog de ingeniería.

- **Piezómetros de cuerda vibrante (3):** Utilizados para monitorizar la presión intersticial en diversos puntos de la presa. Los piezómetros de cuerda vibrante consisten en un sensor de cuerda vibrante embebido en una carcasa de acero con filtro en un extremo. Los piezómetros VW ofrecen una excelente fiabilidad a largo plazo como resultado del uso de los últimos desarrollos en tecnología de cuerda vibrante.

Los piezómetros de cuerda vibrante garantizan una respuesta rápida, estabilidad a largo plazo e inmunidad a las interferencias eléctricas.

El modelo elegido fue un piezómetro piezorresistivo, también llamado piezómetro semiconductor o de galgas extensométricas, de la marca Sigeo. Es un transductor de presión muy preciso, adecuado para lecturas de alta frecuencia. Sus robustas señales de salida de 4-20 mA son fáciles de leer y automatizar y adecuadas para transmisiones de larga distancia. Además, se pueden conectar a registradores de datos sísmicos para monitorear cambios rápidos en la presión del agua intersticial, como los producidos por los terremotos. Sus características son las siguientes:

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	P235S (Sigeo)
Sobrecarga	2 x FS (escala completa)
Sensibilidad	0.01% FS
Linealidad	< ±0.25% FS
Precisión total	< ±0.15% FS
Suministro eléctrico	12 -24 V DC
Aislamiento eléctrico	4 KV
Material	Acero inoxidable
Dimensiones	Ø 27 mm (1.1"), 193mm de longitud (7.6")

Tabla 13: Especificaciones técnicas piezómetro de cuerda vibrante P235S. Fuente: catálogo SISGEO.

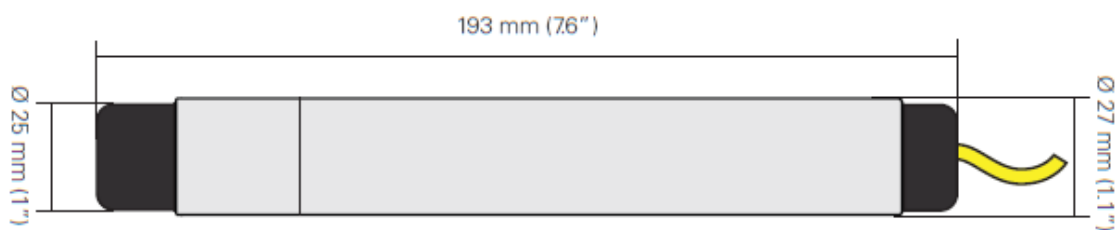


Figura 36: Esquema acotado piezómetro de cuerda vibrante P235S (1). Fuente: catálogo SISGEO.

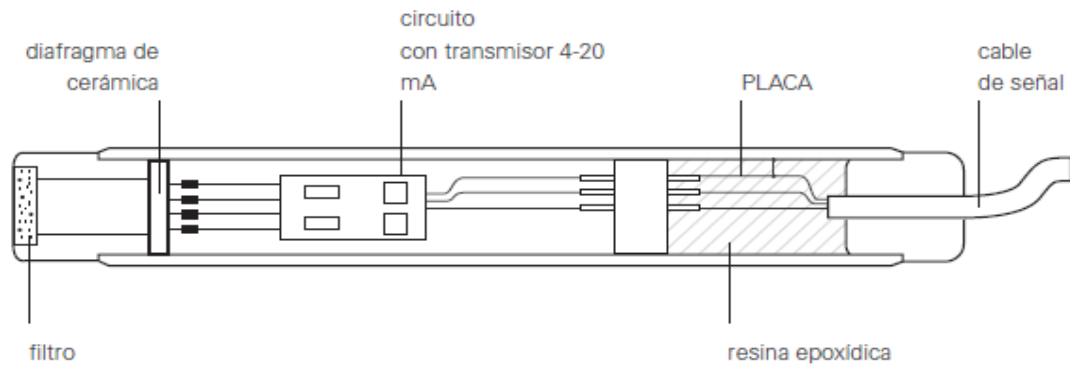


Figura 37: Esquema acotado piezómetro de cuerda vibrante P235S (2). Fuente: catálogo SISGEO.

El método de instalación que se utilizará para los piezómetros es el llamado "método del filtro de arena". El procedimiento constructivo es el siguiente:

1. En primer lugar debemos excavar un sondeo con un diámetro aproximado de 25 cm en el lugar donde vayamos a situar el sensor.
2. Una vez tenemos el sondeo, es el turno de posicionar el sensor a la altura requerida y colocar alrededor de este una capa de arena a modo de filtro.
3. A continuación, por encima del filtro de arena se realizará un sellado utilizando una capa de bentonita de entre 15 y 30 centímetros, consiguiendo aislar la presión de poros en el filtro.
4. Seguidamente y una vez sellado, se rellenará el volumen restante del sondeo mediante una mezcla de cemento y bentonita.
5. Por último, se debe instalar una tapa de protección en la parte superior del sondeo para evitar entradas de agua.

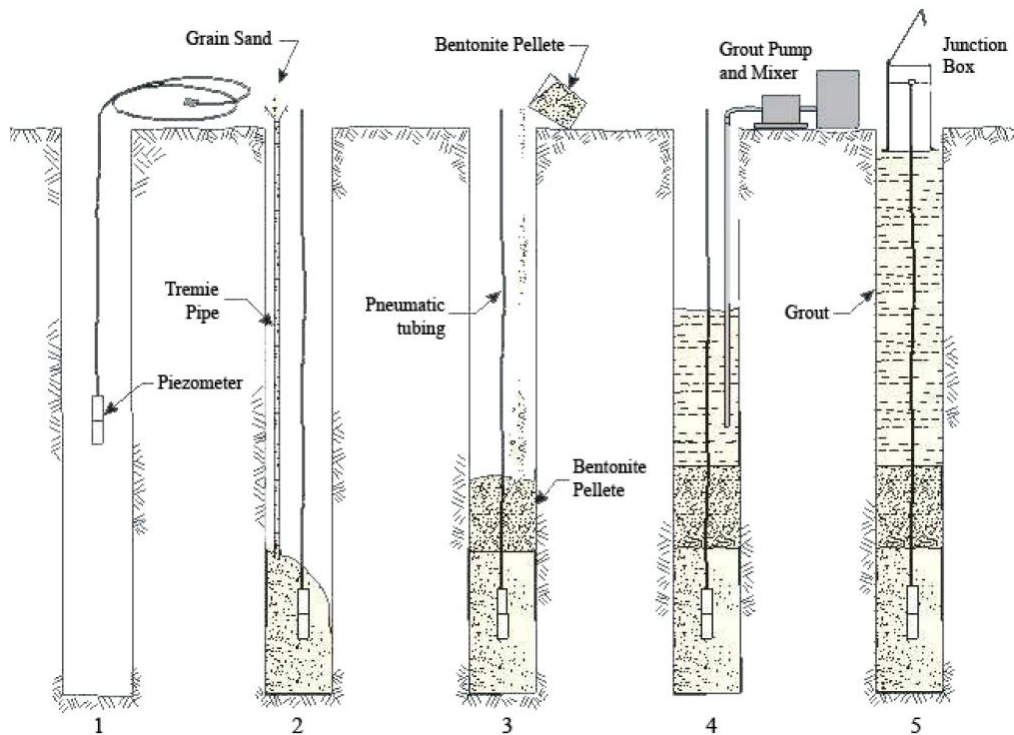


Figura 38: Esquema puesta en obra piezómetro de cuerda vibrante P235S. Fuente: blog de ingeniería.

- **Sensores acelerómetros triaxiales (4):** El acelerómetro triaxial es un equipo muy útil en los distintos tipos de presas para registrar vibraciones en su estructura o en las compuertas cuando se hace uso de ellas y por supuesto para registrar terremotos.

El acelerómetro triaxial se compone de tres elementos: la unidad de proceso, el sensor de aceleración y el GPS, para actualización automática de la hora.

El sensor de aceleración está alojado en un dado metálico, que debe quedar fijado sólidamente a la estructura en la que se deseen controlar las aceleraciones. Además, como en nuestro caso se desea utilizar como sismógrafo, este dado deberá quedar fijado a la estructura de hormigón o a la roca consiguiendo una unión sólida con el terreno.

En el interior del dado está alojado el sensor electrónico que registra la variación de aceleraciones a lo largo de tres ejes (X, Y y Z). En el siguiente dibujo pueden verse las direcciones y sentidos de cada uno de los tres ejes.

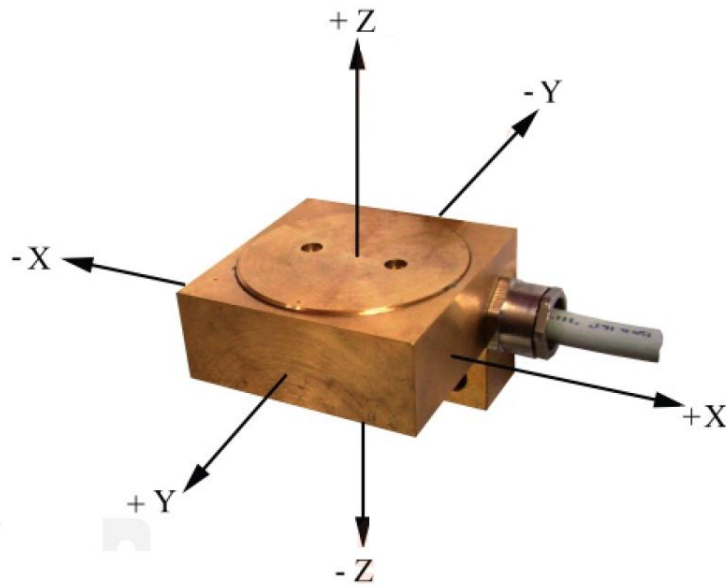


Figura 39: Acelerómetro Triaxial de pozo para perforaciones de profundidad media. Fuente: imágenes de google.

El tipo de acelerómetro escogido fue el Modelo SBEPI de Kinometrics, un equipo triaxial para pozo, rentable y útil para instalaciones en pozos de poca profundidad relativamente (no mayor a 110 metros de profundidad). La unidad consiste en tres módulos de acelerómetros de fuerza balanceada EpiSensor montados ortogonalmente convenientemente dispuestos en un pequeño cilindro. El diámetro de SBEPI es de tan solo 2.625" (6.67 cm) haciéndolo adecuado para instalarse en pozos con ademe de 3" (7.62 cm) de diámetro.

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	Acelerómetro Triaxial
Rango dinámico	155 dB+
Ancho de banda	DC a 200 Hz
Bobina de calibración	Estándar
Rango de escala completa	Seleccionable de fábrica a $\pm 0.25g$, $\pm 0.5g$, $\pm 1g$, $\pm 2g$ o $\pm 4g$
Linealidad	$< 1000 \mu g/g^2$
Histéresis	$< 0.1\%$ FS (escala completa)
Consumo de energía	12 mA desde +/- 12 V (amplificador estándar) 35 mA desde +/- 12 V (amplificador de bajo ruido) 100mA de suministro individual 12Vdc.
Temperatura de operación	de -20° a 70° C (0° a 160° F)
Alojamiento	67 mm de diámetro x 250 mm (2.625 "x 10" acero inoxidable). Provisto de un cable de 40 m

	conectado. El cable de 110 metros es opcional. Estanco a 140 psi.
Peso	2.3 kg (5 lbs). 85 lbs con 40 m de cable en contenedor de envío)

Tabla 14: Especificaciones técnicas acelerómetro triaxial de pozo para perforaciones de profundidad media. Fuente: catálogo KINEMATRICS.

- Medidores de junta (6):** Los medidores de juntas para hormigón permiten detectar los movimientos entre dos anclajes. Los movimientos relativos entre la cabeza del instrumento y los anclajes se pueden medir empleando un calibre digital. Para cada medidor de junta se instala sobre su cabeza un transductor de desplazamiento, diseñados para estar conectados entre ellos.

Un termistor permite la medición de la temperatura para compensar las medidas, si es necesario.

Para finalizar, se deberá contar por cable los transductores con el datalogger automático ADK-100 (Explicado y desarrollado en el Anejo nº 5).

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	D233 (SIGGEO)
Rango de medida	150mm
Precisión	<±0.30 % FS
Rango de frecuencia típico	2250-3000 Hz
Temperatura de operación	-20°C +80°C
Dimensiones del tubo	Longitud 780mm
Material tubo	PVC
Tipo de protección	IP 68 hasta 1.0 Mpa.
Máxima distancia hasta el datalogger	1000m

Tabla 15: Especificaciones técnicas medidor de juntas D233. Fuente: catálogo SIGGEO.

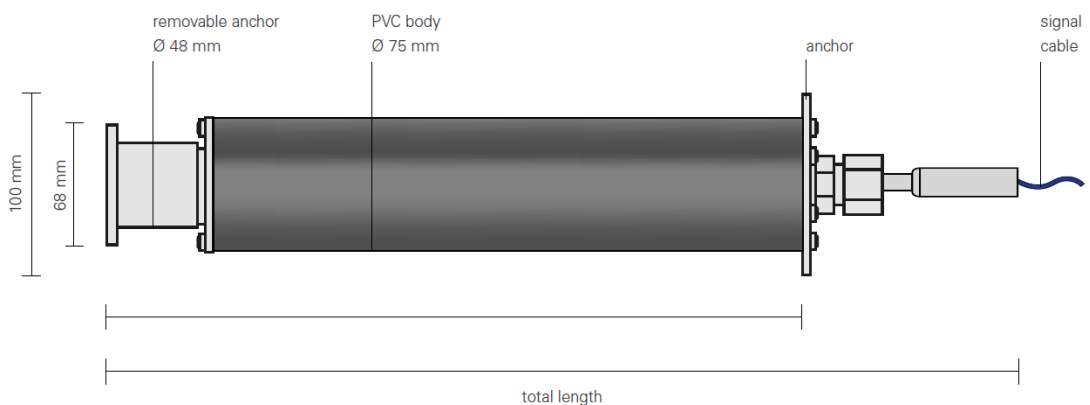


Figura 9: Esquema acotado medidor de juntas D233. Fuente: catálogo SIGGEO.

- **Piezómetros Casagrande (7):** en este caso, como ya se ha comentado anteriormente, los piezómetros de casagrande ya están instalados en la presa, por lo que nuestra única función será conseguir que las mediciones de estos sensores estén automatizadas como en el resto del sistema, ya que actualmente se realizan las mediciones de forma manual.

Para ello, el nivel de agua se medirá con un con un registrador de nivel de agua (WWL) de la marca Sisgeo. El WWL es un sistema integrado diseñado para el control automático y continuo del nivel de agua dentro de pozos, piezómetros abiertos y piezómetros de Casagrande, por lo que se realizarán las mediciones directamente desde la superficie permitiendo determinar el nivel piezométrico del agua subterránea.

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	Registrador de nivel de agua WWL
Rango de temperatura	-20°C +50°C
Exactitud nivel de agua	±0.05% F.S.
Tipo de memoria	±0.5°C
Capacidad de memoria	No volátil
Intervalo de medida	64kbyte >21.000 medidas combinadas
Puerto de comunicaciones	Programable (min 1 s, máx. 18 horas)
Rango de temperatura operativa	-20°C +60°C

Tabla 16: Especificaciones técnicas registrador de nivel de agua WWL. Fuente: catálogo SISGEO.

Los piezómetros hidráulicos tipo Casagrande son instalados en perforaciones y consisten en un filtro unido a una tubería vertical. El procedimiento constructivo es el siguiente:

1. En primer lugar debemos excavar un sondeo con un diámetro aproximado de 25 cm en el lugar donde vayamos a situar el sensor.
2. Una vez realizada la excavación, se introduce el filtro con su tubería vertical en el sondeo, de manera que el sensor quede ubicado en la posición requerida.
3. Posteriormente se debe cubrir el filtro con una capa de arena a modo de filtro.
4. A continuación, por encima del filtro de arena se realizará un sellado utilizando una capa de bentonita de entre 15 y 30 centímetros, consiguiendo aislar la presión de poros en el filtro.
5. Por último, el espacio entre la tubería vertical y la perforación es rellenada con un mortero de cemento para prevenir el movimiento no deseado del agua hacia la superficie.

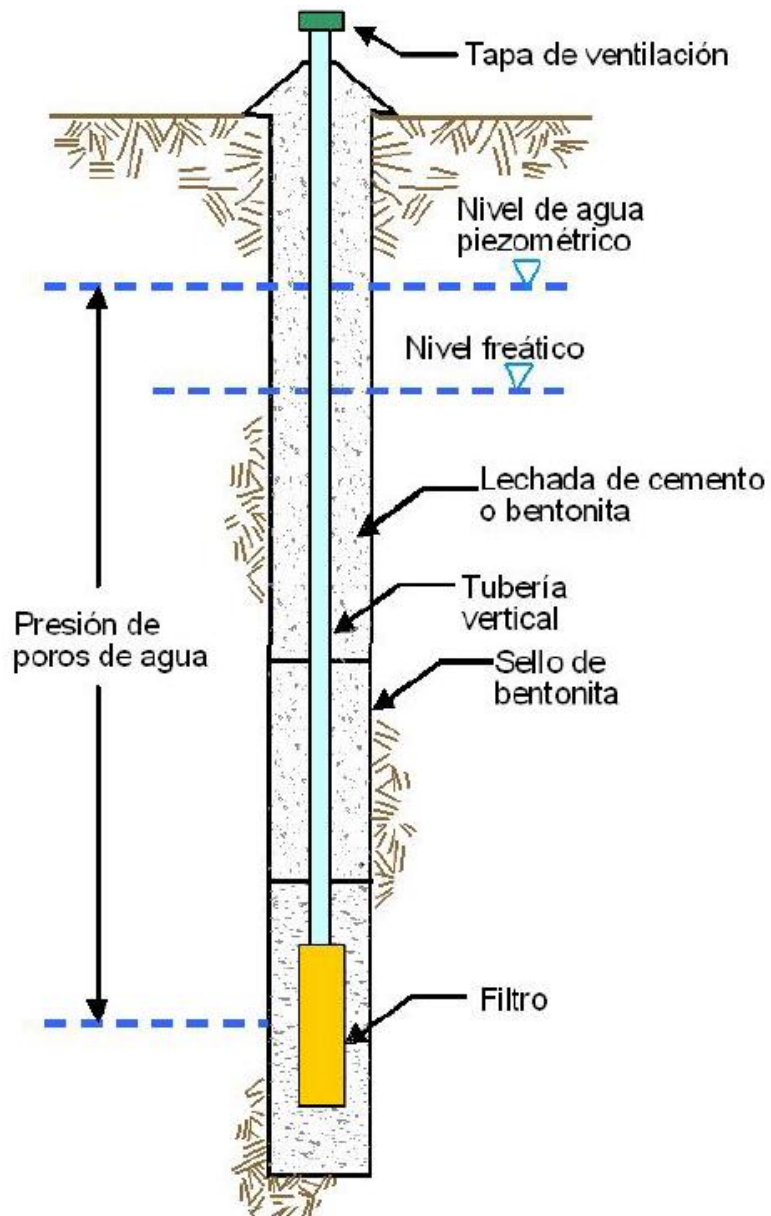


Figura 40: Esquema piezómetro de casagrande. Fuente: blog de ingeniería.

- **Celdas de presión hidráulicas (Celdas de agua) (24):** como ya hemos visto, las celdas de agua están diseñadas para medir los movimientos verticales diferenciales entre dos puntos a través de los cambios de presión.

Las celdas que se quieren monitorizar están conectadas a partir de un tubo doble relleno de líquido a unos depósitos situados en un punto de referencia estable. Actualmente, se miden los asientos midiendo de forma manual la diferencia entre el nivel del depósito y el nivel de la célula, por lo que el principal objetivo será automatizar dicha labor.

Para monitorizar estas mediciones y que se puedan realizar de forma automática, se instalarán en cada una de las celdas de agua transductores eléctricos de cuerda vibrante. Estos, colocados sobre placas metálicas que conforman las celdas, miden la presión del líquido en los tubos, proporcionando una medida de la diferencia de elevación con el depósito de referencia de forma automática.

En concreto se propone instalar la sonda de asientos Profiler de la marca Sisgeo, una sonda hidrostática para líneas de asientos diseñada para el control de asientos o levantamientos bajo terraplenes o cimentaciones. El sistema consiste en una sonda de asientos equipada con un transductor de presiones de alta sensibilidad que se conecta al depósito por un tubo de relleno líquido.

EPECIFICACIONES TÉCNICAS	Sonda de asientos Profiler (Sisgeo)
Rango de medida	8.5 m
Resolución	1 mm
Exactitud total	±20 mm
Retardo	3-10 s
Diámetro	34 mm
Longitud	280 mm
Material	Acero inoxidable

Tabla 17: Especificaciones técnicas sonda de asientos Profiler. Fuente: catálogo SISGEO.

Para facilitar el entendimiento del funcionamiento global del sistema por parte del lector, se han realizado una serie de planos a escala en los que se ha señalado la ubicación exacta de los instrumentos que compondrán el nuevo sistema (tanto los ya instalados como los que se propone instalar). Estos planos se pueden encontrar de forma más detallada en el Documento nº 2 de este trabajo.

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

- Plano en planta de la totalidad de la presa:

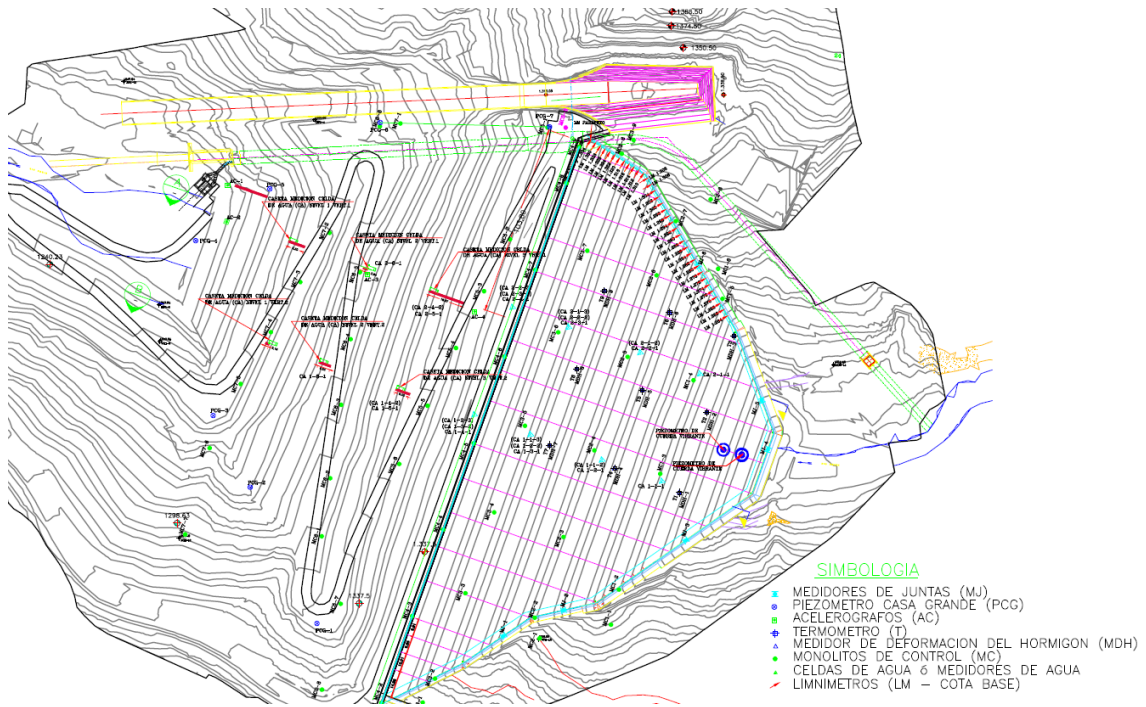


Figura 41: Plano en planta del embalse de Chacrillas (Documento nº 2 – Planos). Fuente: elaboración propia.

- Plano del perfil transversal de la sección Norte:

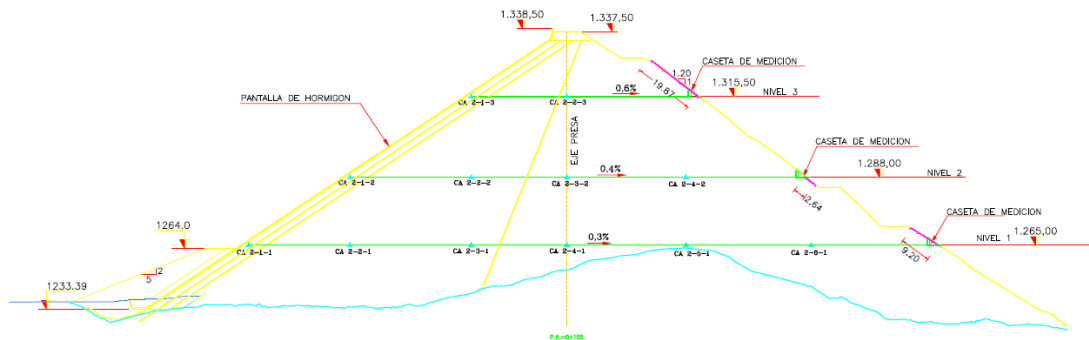
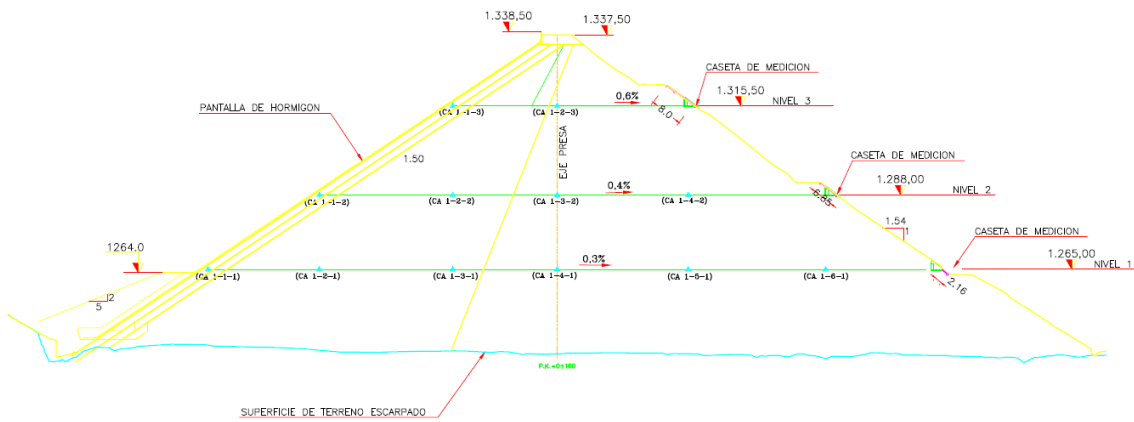


Figura 42: Plano del perfil transversal de la sección norte del embalse de Chacrillas (Documento nº 2 – Planos). Fuente: elaboración propia.


ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN EL EMBALSE DE CHACRILLAS (CHILE)

- Plano del perfil transversal de la sección Sur:



**Figura 43: Plano del perfil transversal de la sección sur del embalse de Chacrillas (Documento nº 2 – Planos).
Fuente: elaboración propia.**

La **simbología** que se ha utilizado en los planos mencionados anteriormente es la siguiente:

- Medidores de juntas (MJ) → 
- Piezómetro de Casagrande (PCG) → 
- Acelerógrafos → 
- Medidor de Deformación del Hormigón (MDH) → 
- Termómetro (T) → 
- Linímetro → 
- Monolitos de Control → 
- Celdas de agua o Medidores de Agua → 

Además, para dejar aún más claro cuál será la ubicación de cada uno de los sensores, se han realizado unas tablas organizadas por tipología, en la que tenemos el listado de todos los sensores de cada tipo, con sus respectivas coordenadas (aproximadas) calculadas una vez realizados los planos.

7. TRATAMIENTO DE DATOS Y SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Anteriormente hemos descrito cuales son los distintos dispositivos que se van a instalar en la presa, pero no se ha comentado aún como se tratarán esos resultados para que puedan ser utilizados de una manera más eficiente en los trabajos de auscultación, ya que normalmente los valores que ofrecen los sensores llegan sin tratar y no tienen en cuenta la totalidad de condicionantes que influyen en el, como por ejemplo la cota de instalación de dicho sensor.

Además, hay que tener en cuenta que la cantidad de datos va a ser inmensa, por lo que necesitamos realizar una gestión muy exhaustiva para tener todos estos datos organizados para que su posterior utilización sea menos tediosa.

Conversión de medidas:

- **Limnómetro:**

El sensor de nivel se encontrará ubicado sobre la pantalla del talud aguas arriba de la presa, aproximadamente en una posición central respecto al eje longitudinal de la misma. La cota del sensor será de 1260 metros sobre el nivel del mar.

Las coordenadas UTM de la posición exacta del sensor serán:

$$E = 354303$$

$$N = 640317$$

El sensor de nivel mide la presión hidrostática del agua situada en la cota superior al mismo en kilopascales (kPa). Para conseguir la cota del nivel del agua del embalse lo más sencillo es realizar una conversión de kilopascales a metros de columna de agua, una unidad de presión que como bien es sabido equivales a la presión ejercida por una columna de agua pura de un metro de altura sobre la gravedad terrestre (m.c.a).

La presión relativa en el fondo de una columna de agua de 1 m de altura es:

$$P = \rho \times g \times h = 1000 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \times 9,80665 \left(\frac{m}{s^2} \right) \times 1 m = 9806,65 Pa ;$$

$$9806.65 Pa = 9,80665 KPa = 1 m. c. a ;$$

$$1 KPa = \frac{1}{9,80665} m. c. a = 0.101972 m. c. a$$

De esta manera, para realizar la conversión a metros de columna de agua se deberá multiplicar el valor medido por la constante 0,101972, obteniendo así la cota relativa del nivel de agua del embalse respecto al sensor en metros de columna de agua.

Para obtener la cota absoluta respecto al nivel del mar se deberá sumar al resultado de la operación anterior la cota del sensor, igual a 1260 m.

Por lo tanto, se deberá aplicar la siguiente expresión con los datos recibidos desde el nodo sensor para obtener la cota absoluta del embalse.

$$Cota (m) = presión (kPa) \cdot 0,101972 + 1260$$

Esta expresión solo podrá ser aplicada para valores de presión distintos de cero y positivos. En caso contrario, no se podrá aplicar debido a que no es posible obtener cuál es la cota real situada debajo del sensor (el único dato conocido será que es menor a la cota absoluta del sensor).

- **Sensor de deformación:**

Estos sensores están identificados por las siglas MDH y funcionan de manera análoga a los medidores de juntas. El modelo de sensor es el "Roctest modelo EM-5".

Se deberá obtener la medida en frecuencia del sensor, a partir de la siguiente expresión:

$$Frecuencia (Hz) = 1000 \cdot Voltaje (V) + 500$$

Para calcular la deformación actual del sensor (ϵ) se deberá aplicar la siguiente expresión:

$$\epsilon = K \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{N^2}$$

Donde:

ϵ = deformación medida (en microdeformaciones)

K = constante de la galga = 4,0624

N = periodo medido (en microsegundos)

Por lo tanto, previo a esta expresión, será necesario convertir el valor de frecuencia obtenido al periodo correspondiente en microsegundos:

$$N (\mu s) = \frac{10^6}{Frecuencia (Hz)}$$

Finalmente, se puede obtener el valor de deformación del sensor aplicando la expresión anterior:

$$\varepsilon = 4,0624 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{N^2}$$

Si se conoce el valor original de deformación del sensor durante su instalación, se podrá obtener el valor de deformación relativo como la resta del valor obtenido y el original:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{medido} - \varepsilon_0$$

- **Sensor de temperatura:**

Las lecturas de la temperatura en los termómetros OT111PT1000 se realizarán con un multímetro digital para medir la termorresistencia y después poder convertirlo temperatura a través de una tabla de conversión que relaciona la temperatura (C°) y la resistencia (kΩ).

- **Piezómetros de cuerda vibrante:**

La señal de salida de estos sensores es una señal de frecuencia, no afectada por la impedancia de línea y la resistencia de contacto, lo que permite la transmisión a través de distancias largas.

Para realizar el tratamiento de los datos, de manera análoga a los anteriores, primero se deberá convertir el valor de tensión medido en su correspondiente valor en frecuencia:

$$Frecuencia (Hz) = 1000 \cdot Voltaje (V) + 500$$

A continuación, se obtendrá el valor correspondiente en unidades lineales (L) a partir del valor medido en frecuencia (Hz):

$$L = 1,0156 \cdot \frac{F^2}{1000}$$

Finalmente, se puede obtener el valor de presión medido en kilopascales (kPa) a partir de la siguiente relación lineal:

$$P (kPa) = C_f \cdot L$$

Donde C_f es el factor de calibración individual de cada sensor.

De igual manera a los sensores de deformación, si se conoce la lectura inicial del sensor durante su instalación es posible obtener la medida de presión relativa como la resta de ambos valores:

$$\Delta P \text{ (kPa)} = P_{\text{medido}} - P_0$$

- **Acelerómetro de cuerda vibrante:**

No es necesario realizar ningún tratamiento de la información ya que el dispositivo acelerómetro utilizado nos ofrece un valor de aceleración directamente.

- **Medidores de junta:**

Los medidores de juntas son aquellos identificados por las siglas MJ. Se trata de sensores de cuerda vibrante y por lo tanto su valor se obtiene a partir de la frecuencia de vibración medida.

Los aparatos de medición de cuerda vibrante tienen un rango de entrada en frecuencia seleccionado de 500 hasta 3000 Hz, y un rango de tensión de salida de 0 a 2,5 V. Es decir, una frecuencia medida de 500 Hz corresponde a un valor de tensión de 0 V y para una frecuencia máxima de 3000 Hz el valor de salida es de 2,5 V.

Por lo tanto, para obtener la frecuencia medida del sensor se deberá aplicar la siguiente expresión:

$$\text{Frecuencia (Hz)} = 1000 \cdot \text{Voltaje (V)} + 500$$

A continuación, se deberá convertir el valor de frecuencia obtenido (en Hz) a valores de unidades lineales aplicando la siguiente expresión:

$$L = \frac{F^2}{1000}$$

Finalmente, una vez obtenido el valor de salida del sensor en unidades lineales, se podrá obtener el desplazamiento del mismo (en milímetros) a partir de esta expresión:

$$D \text{ (mm)} = A \cdot L^2 + B \cdot L + C$$

Donde A, B y C son constantes de calibración individuales de cada uno de los sensores.

Si se conoce el desplazamiento inicial del sensor durante su instalación, se puede obtener el desplazamiento relativo como:

$$\Delta D = D_{medido} - D_0$$

- **Piezómetros Casagrande:**

En este caso el proceso para tratar los datos será el mismo que para el sensor de nivel, ya que se utilizan la misma tipología de sensores. De esta manera, para conseguir la cota del nivel del agua de cada uno de los pozos lo más sencillo es realizar una conversión de kilopascales a metros de columna de agua, una unidad de presión que como bien es sabido equivales a la presión ejercida por una columna de agua pura de un metro de altura sobre la gravedad terrestre (m.c.a).

La presión relativa en el fondo de una columna de agua de 1 m de altura es:

$$P = \rho \times g \times h = 1000 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \times 9,80665 \left(\frac{m}{s^2} \right) \times 1 m = 9806,65 Pa ;$$

$$9806.65 Pa = 9,80665 KPa = 1 m. c. a ;$$

$$1 KPa = \frac{1}{9,80665} m. c. a = 0.101972 m. c. a$$

De esta manera, para realizar la conversión a metros de columna de agua se deberá multiplicar el valor medido por la constante 0,101972, obteniendo así la cota relativa del nivel de agua del pozo respecto al sensor en metros de columna de agua.

- **Celdas de presión hidráulicas (Celdas de agua):**

Para obtener es asiento producido en metros, deberemos de seguir la siguiente fórmula lineal (proporcionada por el fabricante):

$$\Delta m = C.F \times (Li - Lc) - [T.K.m \times (Ti - Tc)] + \Delta Rm - [0.0953 \times (Bi - Bc)]$$

Donde:

- **T.K.m** = Sensor Temperature Correction Factor (m/°C).

- **Bi** = Presión Barométrica Inicial (Kpa).

- **Bc** = Presión Barométrica Actual (Kpa) .
- **C.F.** = Lineal Calibration factor (m.)
- **Li** = Lectura inicial Digits "B" Units .
- **Lc** = Lectura Inicial Actual "B" Units .
- **ΔRm** = Reference Error correction in meters
- **C.F. (m)** = Valor de acuerdo a cada sensor
- **T.k. (m/°C)** = Valor de acuerdo a cada sensor

El conjunto de la sensórica a instalar en el embalse de Chacrillas estará compuesta por un total de 32 sensores, cuyas conexiones se realizarán en un sistema de adquisición de datos situado en una caseta de control. En concreto, el sistema de adquisición de datos que se va a utilizar es el ADK-100 de Sisgeo, ya que es compatible con toda la sensórica instalada.

Sisgeo ADK-100 es un registrador de datos multifunción potente y versátil con un sistema operativo multitarea que permite la ejecución simultánea de las funciones de medida y de comunicación. Permite gestionar simultáneamente hasta 192 canales analógicos o 96 canales diferenciales.

El datalogger ADK-100 está diseñado para su uso en campo, ya que está alojado en una carcasa de acero inoxidable IP65, resistente al agua. ADK-100 es ideal no sólo para el registro de datos, sino también para la notificación de alarmas cuando algún parámetro del sensor supera el umbral prefijado.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	REGISTRADOR DE DATOS ADK.100 (Sisgeo)
Procesador	Renesas H8S 2322
Memoria	2MB flash, 4MB SRAM para datos
Entradas analógicas	6 diferenciales ampliable mediante multiplexor (MUX) hasta 192
Puertos I/O digitales	8 puertos seleccionables por software como entradas binarias o salidas de control.
Rango	de ±2.5 mV hasta ±5.0 V DC
Frecuencia	hasta 200 kHz
Resolución	desde 0.33 ÷V hasta 1330 ÷V
Exactitud	0.06% de lectura+offset (0 a 40°C)
Puerto de comunicación	CS I/O para interfaces Campbell, RS232 para otras interfaces
Fuente de alimentación	12V 7.2 Ah batería recargable 85-264V AC-50/60 Hz por cable de alimentación IP67

Temperatura de alimentación	-25°C +50°C
------------------------------------	-------------

Tabla 18: Especificaciones técnicas registrador de datos ADK-100. Fuente: catálogo SISGEO.

Estas conexiones estarán organizadas mediante distintos canales de entrada al sistema de adquisición de datos, a los que hemos asignado un número del 0 al 78.

Para los sensores ubicados en la caseta se realizará una lectura cada cinco minutos, se almacenan los datos en un archivo de texto y se envían al servidor a través de FTP.

El sensor de nivel funciona de manera análoga, realiza la lectura cada cinco minutos y se conecta al WIFI de la caseta para enviar el archivo con la medida al servidor a través de SCP.

Debido a problemas de cobertura de señal es posible que no se logre establecer una conexión correcta entre ambos puntos en todo momento, por lo que el periodo de recepción de datos para este sensor puede ser mayor al de los demás.

La alimentación será eléctrica a 220V y se situará en el interior de la caseta. Para el sensor de lectura de nivel se utilizará alimentación mediante placa solar.

8. CONCLUSIONES

En este apartado se expondrán las conclusiones extraídas de la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Anteriormente, puede que la mejor herramienta para garantizar la seguridad de las presas haya sido llevar a cabo una explotación cuidadosa, pero si algo ha quedado claro con la realización de este trabajo es que actualmente la auscultación está comenzando a ser cada vez más importante en el estudio de casos patológicos y, sobre todo, en la posterior observación necesaria para conocer el grado de eficacia de la solución construida.

Además, cabe destacar que llevar a cabo una auscultación continúa ayuda a prevenir la aparición de dichas patologías, por lo que se puede afirmar que en estos momentos que la realización de este tipo de trabajos es forma más rentable de gestionar una infraestructura de este calibre.

El sistema de monitorización que se ha desarrollado en el presente trabajo clarifica lo relativamente fácil que puede llegar a ser de implantar en una presa de materiales sueltos, demostrando además una infinidad de ventajas en lo que al mantenimiento de la infraestructura se refiere.

Con todo lo acontecido anteriormente se entienden suficientemente descritas las obras y equipos que conforma la propuesta para llevar a cabo un sistema de monitorización en el Embalse de Chacrillas (Chile).

9. BIBLIOGRAFÍA

- La importancia de contar con estructuras de almacenamiento y captación de agua-Haberland. A, Julio (Ingeniero Agrónomo PhD) Universidad de Chile.
- Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (2012 – 2025) – Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Directorio de Presas de Suelo/Enrocado (2017) – Comité Nacional Chileno de Grandes Presas.
- Directorio del Comité Nacional Chileno de Grandes Presas (ICOLD Chile).
- Biblioteca de Congreso Nacional de Chile. Legislación chilena.
- Fleitz, J. (2001). Auscultación de presas y su cimentación. Revista de obras públicas, (3.407),35.
- Informe del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Estudio “Diseño Embalse de Chacrillas” por EDIC, 2002.
- Jornada de Erosión Interna de Presas. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 16 de abril de 2010. Fernando P. de Santayana.
- Martínez, R., Barrera, S., & Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico. Obras y proyectos, (9), 30-37.
- Torres Castillo, P. A. (2011). Análisis numérico del comportamiento sísmico de la presa convento viejo.
- Catastro e Inspección Preliminar de Embalses Región Coquimbo. Resumen ejecutivo. Aquaterra Ingenieros Ltda. Santiago, Marzo de 2009. S.I.T Nº 174.
- Auscultación de Presas de Materiales Suelos por A. Pérez Saiz. Director de OFITECO.
- Spanish Catalogue of Geotechnical Instrumentation (Sisgeo).
- Nuevas tecnologías de auscultación. Jürgen Fleitz y Stefan Hoppe.
- Sam Johansson, Dan Watley, “Optical Allusions”, International Water. Power and Dam Construction, 2004

- Análisis de factibilidad técnica trasvase recursos hídricos hacia los valles de Ligua y Petorca desde el sistema Putaendo, V Región. Informa final (2009). Comisión Nacional de Riego (Gobierno de Chile).