

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE CIVIL

“ESTUDIO DE LA INSTRUMENTACIÓN A UTILIZAR EN LAS PRESAS DE TIERRA DEL PROYECTO PACALORI”

TESIS PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL

AUTORES:

CARLOS ALBERTO BELTRÁN TENORIO
JUAN JOSÉ VINTIMILLA SÁNCHEZ

DIRECTOR:

ING. ROLANDO ARMAS NOVOA, MSc.

CUENCA – ECUADOR
2014



RESUMEN:

El presente estudio de investigación se enfoca en definir la instrumentación necesaria para la presa de tierra Lechugal 2, perteneciente al proyecto PACALORI (Plan de Aprovechamiento y Control de Aguas de la Provincia de Los Ríos) y que sirva de metodología en el diseño de la instrumentación de las doce presas restantes del proyecto. Previamente se investigó las necesidades de monitoreo que se presentan en una presa de tierra, el tipo de instrumentación que se utiliza y la ubicación de los mismos en las secciones más sensibles o críticas de la presa, que pueden producir daños o cambios significativos durante su explotación. Luego de analizar todos los parámetros e integrar la economía del proyecto, que se presenta como un obstáculo en la selección del tipo de instrumentos por los costos, se plantea el uso de piezómetros de Casagrande para el control de la LCS (Línea de Corriente Superior) y el nivel freático. Igualmente se investigó el uso de monumentos topográficos para la observación de los movimientos horizontales y verticales de la presa, al fin de generar un monitoreo mínimo con datos fiables en el análisis del comportamiento de la presa. Para ubicar los piezómetros y construir los monumentos se presentaron recomendaciones de las dimensiones, formas y cotas de instalación, como también el método de obtención de los datos para su posterior análisis. Finalmente, con esta información se procede a la localización de la instrumentación en las secciones de la presa para su presentación en planos, que serán utilizados durante la construcción.

PALABRAS CLAVE: PACALORI, presa de tierra, instrumentación, monitoreo, LCS, nivel freático, presión de poros, piezómetros, monumentos topográficos, hitos.



ABSTRACT:

This research focuses on defining the necessary instrumentation for Lechugal 2 earth dam belonging to PACALORI project (Plan de Aprovechamiento y Control de Aguas de la Provincia de Los Ríos) and to serve as a methodology in the design of instrumentation for the remaining twelve dams of the project. Previously, the monitoring requirements presented in an earth dam, the type of instrumentation used and their location in sensitive or critical parts of the dam, which may damage or significant changes during operation were investigated. After analyzing all these parameters and integrate them to the economy of the project, which is presented as an obstacle in the selection of instruments by their costs. We propose the use of Casagrande piezometers to control the higher current line (LCS for its acronym in Spanish) and the water table. The use of survey monuments for the observation of the horizontal and vertical motions are also investigated, in order to generate a minimal monitoring data on analyzing the behavior of the dam. To locate the piezometers and build the monuments with recommended dimensions shapes and installation levels, as well as the methodology of data collection for posterior analysis. Finally, with this information we proceed to the location of the instrumentation in the sections of the dam for their presentation in maps that will be used during construction.

KEYWORDS: PACALORI, earth dam, instrumentation, monitoring, LCS, water table, pore pressure, piezometers, survey monuments, milestones.



CONTENIDO:

RESUMEN:	2
ABSTRACT:	3
INTRODUCCIÓN	13
- ANTECEDENTES:	14
- JUSTIFICACIÓN:	15
- OBJETIVOS:	16
- Objetivo General:	16
- Objetivos Específicos:	16
CAPÍTULO 1	17
MARCO TEÓRICO	17
1.1. PRESAS:	17
1.1.1 Presas de materiales sueltos:	18
1.1.2 Partes de una presa de tierra:	19
1.2 PRESAS DEL PROYECTO PACALORI:	21
1.3 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN:	24
1.4 PIEZÓMETROS:	25
1.5 INSTRUMENTACIÓN A BASE DE TESTIGOS SUPERFICIALES:	26
1.6 ESTABILIDAD DE TALUDES Y PRESIÓN DE POROS EN PRESAS DE TIERRA	28
1.6.1 Estabilidad de Taludes en presas de tierra:	28
1.6.2 Presión de poros en presas de tierra:	30
CAPÍTULO 2	32
MATERIALES Y MÉTODOS	32



2.1. ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN	32
2.2 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS:.....	32
2.2.1. Tipos de piezómetros para medir la presión de poros:	38
2.2.1.2 Piezómetros Hidráulicos:.....	39
2.2.1.3 Piezómetros Neumáticos:.....	41
2.2.1.4 Piezómetros Eléctricos:	42
2.3 MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES:	43
2.3.1 Tipos de monumentos:	44
2.3.1.1 Testigos Superficiales:.....	45
2.3.1.2 Bancos de referencia:.....	45
2.3.2 Localización de Monumentos:.....	46
2.3.3 Construcción de monumentos:	47
2.3.4 Métodos topográficos para obtener los desplazamientos:.....	52
2.3.4.1 Método topográfico para obtener los desplazamientos horizontales:	52
2.3.4.1.1 Toma de Lecturas:.....	53
2.3.4.1.2 Cálculo:	54
2.3.4.2 Método topográfico para obtener los desplazamientos verticales:	56
2.3.4.2.1 Toma de Lecturas:.....	57
2.3.4.2.2 Cálculo:	58
 CAPÍTULO 3.....	 59
 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 59
3.1. DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA LA PRESA LECHUGAL 2.....	59
3.1.1 Piezómetros a utilizar en la presa Lechugal 2:.....	59
3.1.2 Instalación piezómetro de Casagrande:.....	63
2.1.3.2 Funcionamiento piezómetro de Casagrande:.....	65
3.1.1 Hitos a utilizar en la presa Lechugal 2:.....	66
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 70
CONCLUSIONES:	70
RECOMENDACIONES:.....	72
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	 74
 ANEXOS	 76



INDICE DE FIGURAS:

Figura 1.1: Tipos de Presas	18
Figura 1.2: Partes de una presa de tierra	19
Figura 1.3: Límites del Proyecto PACALORI.....	23
Figura 1.4: Ubicación referencial de monumentos para control topográfico.	27
Figura 1.5: Factor de seguridad para el método de Fellenius. Presa Lechugal 2.	30
Figura 2.1: Mapa de ubicación de los cortes transversales.	34
Figura 2.2: Línea de corriente superior – Presa Lechugal 2 – Corte A3 – 0+200	34
Figura 2.3: Zonas críticas de la presa Lechugal 2.....	35
Figura 2.4: Mapa ubicación de perforaciones – Presa Lechugal 2.....	36
Figura 2.5: Perforación presa Lechugal 2 – Sondeo 1.....	37
Figura 2.6: Perfil Litológico del cierre de la Presa Lechugal 2.....	38
Figura 2.7: Piezómetro de tipo de tubo vertical de Casagrande, utilizado en perforaciones.	39
Figura 2.8: Piezómetro hidráulico.....	40
Figura 2.9: Piezómetro neumático.	41
Figura 2.10: Piezómetro de cuerda vibrante.	43
Figura 2.11: Testigo superficial.	45
Figura 2.12: Banco de referencia.	46
Figura 2.13: Dimensiones (TSMH).....	48
Figura 2.14: Perno de centraje forzoso y plataforma porta instrumento con tapa	48
Figura 2.15: Dimensiones de los TSMV.....	49
Figura 2.16: TSMV sobre el enrocado del talud.	49
Figura 2.17: Monumento de centraje forzoso.....	50
Figura 2.18: Banco de nivel de red primaria.....	51
Figura 2.19: BN de la Red secundaria.	51
Figura 2.20: Estación Total.	53
Figura 2.21: Calculo de distancias horizontales.	55
Figura 2.22: Nivel topográfico para mediciones verticales.....	56
Figura 3.1: Piezómetro Casagrande.....	64
Figura 3.2: Formas de instalar piezómetros en un mismo punto.	65

INDICE DE TABLAS:

Tabla 1.1: Clasificación Presas Pequeñas Proyecto PACALORI.....	21
Tabla 1.2: Clasificación Grandes Presas Proyecto PACALORI.....	22
Tabla 1.3: Factores influyentes en la inestabilidad de los Taludes.	29
Tabla 3.1: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A3 - 0+200.....	62
Tabla 3.2: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A4 - 0+300.....	62
Tabla 3.3: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A6 - 0+400.....	62
Tabla 3.4: Ubicación de piezómetros en Laderas y Estación de Bombeo.	63
Tabla 3.5: Ubicación de monumentos BRCH.	66
Tabla 3.6: Ubicación de monumentos BN.....	66



Yo, Carlos Alberto Beltrán Tenorio, autor de la tesis “Estudio de la Instrumentación a utilizar en las Presas de Tierra del Proyecto PACALORI”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 20 de Octubre de 2014

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Carlos Alberto Beltrán Tenorio'. The signature is written in a cursive style and is positioned above a solid horizontal line.

Carlos Alberto Beltrán Tenorio
C.I: 0104639869

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867



Yo, Juan José Vintimilla Sánchez, autor de la tesis “Estudio de la Instrumentación a utilizar en las Presas de tierra de Proyecto PACALORI”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 20 de Octubre de 2014



Juan José Vintimilla Sánchez
C.I: 010425353-9



Yo, Carlos Alberto Beltrán Tenorio, autor de la tesis “Estudio de la Instrumentación a utilizar en las Presas de Tierra del Proyecto PACALORI”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 20 de Octubre de 2014

A handwritten signature in blue ink, reading 'Carlos Alberto Beltrán Tenorio', enclosed in a large, stylized blue oval. Below the signature is a horizontal line.

Carlos Alberto Beltrán Tenorio
C.I: 0104639869



Yo, Juan José Vintimilla Sánchez, autor de la tesis “Estudio de la Instrumentación a utilizar en las Presas de tierra de Proyecto PACALORI”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 20 de octubre de 2014

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to read "Juan José Vintimilla Sánchez".

Juan José Vintimilla Sánchez
C.I: 010425353-9



No hay palabras suficientes para expresar todo mis sentimientos de amor y agradecimiento a mis padres Alberto, Patricia y a mi abue Chave, por el apoyo y la paciencia brindada en todo este camino. Perseverancia, fuerza y nunca rendirse son sus lemas que me acompañaron todos estos años. Mis logros son enteramente suyos.

C. Alberto Beltrán T.

Quiero dedicar este logro a mi padre Marcelo Vintimilla que siempre me apoyo en todo y fue un ejemplo a seguir para alcanzar este objetivo, a mi madre Mercy Sánchez que con su cariño y paciencia siempre estuvo a mi lado en las buenas y en las malas, a mis hermanos Viviana y Javier que de una u otra manera me ayudaron (deberes de ingles), a mi novia Karen Roche que con su apoyo y cariño estuvo a mi lado para alcanzar mis metas y la responsable de terminar pronto esta tesis.

También a mis amigos y compañeros Juan Diego Moscoso, Pedro Castro y Eduardo Moreno por su compañía y confianza en toda la carrera.

Y a todas las personas que aportaron para cumplir esta meta.

Juan José Vintimilla Sánchez



AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar quisiéramos expresar nuestra gratitud y agradecimiento al Ing. Rolando Armas, Msc por presentarse como un excelente tutor y amigo, quien no solo nos compartió su conocimiento, si no también nos apoyó con dedicación, esmero y alegrías durante todo el proceso de esta investigación.

A nuestras familias, por ser siempre nuestro apoyo durante todo este largo viaje universitario y compartir con nosotros todas las alegrías que comprendieron el trayecto de una etapa tan importante de nuestras vidas.

A todos los compañeros del PROMAS que nos brindaron su ayuda en cada momento con concejos y recomendaciones para realizar este trabajo.

Y a todas las personas que de una u otra manera se involucraron en este proyecto, buscando siempre ser un soporte en esta investigación.

Carlos Alberto Beltrán Tenorio
Juan José Vintimilla Sánchez



INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las presas han consistido en proyectos de ingeniería muy importantes para el crecimiento de una comunidad, ya que la disponibilidad de agua aporta a su desarrollo de varias formas, motivo por el cual su estudio, diseño y seguridad son esenciales durante la construcción y posterior mantenimiento de estas grandes estructuras.

Para el proyecto PACALORI (Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos) se tiene previsto el diseño y construcción de trece presas de tierra divididas en 2 trasvases que contendrán aproximadamente 840 hm^3 para riego de la zona.

Uno de los principales objetivos en la ejecución de este proyecto es mantener la seguridad durante los procesos de construcción y funcionamiento. Aquí la instrumentación cumple un papel importante, ya que mediante la recolección de datos por monitoreo se obtendrá información confiable para prevenir o alertar cualquier situación de riesgo. Por lo tanto en esta investigación se planteará diseñar la instrumentación necesaria en base a los datos y requerimientos de una de las presa más altas del proyecto PACALORI (Lechugal 2 – 23 m de altura), y así el diseño sea la guía para la instrumentación del resto de presas.

La investigación se dividirá en dos partes. La primera en donde se indagará el tipo de piezómetros que se usarán en la construcción de las presas del proyecto, basándonos en la forma geométrica de las presas, sus partes, ubicación de la línea de corriente superior (LCS) y en la presión de poros (agua y aire) que se producirá en el material de la cortina. Los técnicos del proyecto PACALORI han realizado un exhaustivo análisis de estabilidad de los taludes por varios métodos (Bishop, Fellinius), para así obtener un rango de valores para un factor de seguridad apropiado. El uso de los piezómetros desde la etapa de la construcción servirá para brindar información al constructor sobre la velocidad de construcción de la presa según la proyección de la presión de poros en las cortinas presentado en los estudios de Mecánica de Suelos del proyecto.

Así, también se ve la necesidad de usar instrumentación superficial básica, como son los hitos o testigos, que se diseñarán para la corona y bermas de la presa. La medición de movimientos superficiales se los puede realizar de manera rápida, eficiente y precisa con métodos de nivelación básicos y sencillos, usando estaciones totales.

Esta segunda parte se enfocará en los métodos de medición a usar para movimientos verticales y horizontales en la alineación, equipo necesario, tipo de hitos o testigos, ubicación de los hitos según su importancia y uso, toma de lecturas y construcción de los monumentos.



La instrumentación permitirá comprobar la realidad con las hipótesis del proyecto, y trabajar en consecuencia de los resultados.

Con estos dos tipos de instrumentación se espera obtener datos suficientes y de calidad para el control y mantenimiento de las presas, desde su etapa de construcción y posterior funcionamiento, brindando seguridad al proyecto.

- ANTECEDENTES:

La provincia de Los Ríos está ubicada en la cuenca hidrográfica del río Guayas que representa un 20 % de la misma. Los ríos Vinces y Babahoyo son los principales afluentes de la provincia. Esta zona central de la costa ecuatoriana presenta un régimen de lluvias muy específico en el año. Entre los meses de enero y mayo se produce el 80 % de la precipitación anual. Este régimen provoca que la zona se inunde y afecte gravemente a la producción agrícola del lugar, además de incomunicar a varios poblados rurales de la provincia. Desde hace varios años las entidades gubernamentales han formulado planes de contingencia por inundaciones a nivel cantonal y fortalecimiento institucional en tema de gestión de riesgos, dirigido a contar con una herramienta que facilite el manejo de un evento adverso, como lo son las inundaciones en sectores vulnerables. Además, la SENAGUA que maneja el aprovechamiento y control de los recursos hídricos en el Ecuador, ha priorizado tomar acciones que permitan regular el potencial hídrico en la cuenca del río Guayas. El objetivo de tomar estas acciones es el de subsanar los problemas de sequías e inundaciones, para garantizar un acceso equitativo al agua durante todo el año. Es por eso que se emprende con el proyecto PACALORI que abarca grandes obras de infraestructura hidráulica, que permitirá almacenar el agua durante la época lluviosa y usarla en la época seca.

La principal parte del proyecto PACALORI es el diseño de 13 presas de tierra que contendrá agua suficiente para el riego y abastecimiento de 100.000 ha agrícolas de la provincia de los Ríos. A parte de todo el diseño que abarcan estas estructuras, cabe recalcar que la seguridad en un proyecto de esta magnitud es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema global del proyecto y sobre todo que la vida útil de las presas que se diseñan para 50 años aproximadamente estén respaldadas por un control y monitoreo que advierta cualquier eventualidad. Así se podrá corregir y dar mantenimiento a cualquier presa que lo requiera, ya que la historia mundial nos ha enseñado de grandes tragedias que pueden suceder si una estructura colapsa, provocando mayores daños que los jamás previstos, tanto humanos como económicos.



Presentando la realidad de la provincia de los Ríos y de los efectos que tiene el clima en la población, tanto como de salud, desarrollo y económico es necesario recalcar la importancia del proyecto PACALORI, ya que sus objetivos son de gran impacto social. Aquí es donde el proyecto de instrumentación para las presas toma importancia, porque de ello dependerá el correcto funcionamiento de las principales estructuras de un proyecto de gran valor nacional.

- JUSTIFICACIÓN:

El estudio de la instrumentación para las presas de tierra del proyecto PACALORI garantizará un correcto control y monitoreo de los fenómenos básicos que se desarrollan durante la construcción y posterior explotación de una presa. Estos fenómenos como la infiltración del agua a través de la estructura de retención y los movimientos, deformaciones, presiones y deterioro de los materiales constituyentes de las presas, generados por la presión del agua, deben ser siempre evaluados para conocer como se está comportando la obra. Hay que tener en cuenta que todos estos efectos también se presentarán en la cimentación de las presas y deberán tener parámetros acorde a las hipótesis de diseño, pero la aparición de anomalías podrá representar daños que pueden comprometer el correcto funcionamiento del proyecto.

Es por eso que la instrumentación se convierte en una parte fundamental de cualquier obra de magnitud, porque con ella se cuidará las obras que tienen un gran impacto social y además económico, para la construcción del proyecto.

En la actualidad existen tecnologías que permiten determinar cualquier imprevisto que pueda existir y monitorear todo lo que se presente. Un proyecto que contenga todos estos nuevos instrumentos tecnológicos podría costar millones. Ahí es donde un buen proyecto ingenieril se destaca, ya que con los diseños adecuados se optimiza el número y tipo de instrumentos a colocar, y se controlará lo estrictamente necesario, pero sin dejar de lado la seguridad del proyecto.



- **OBJETIVOS:**

- **Objetivo General:**

Definir la instrumentación necesaria para la presa de tierra Lechugal 2, y que sirva de metodología en el diseño de instrumentación en las presas del proyecto PACALORI.

- **Objetivos Específicos:**

- Determinar los tipos de piezómetros a utilizarse, su ubicación y requerimientos técnicos.
- Determinar el número y ubicación de los hitos topográficos.
- Definir los métodos de medición de los movimientos horizontales y verticales de cortina y cimientos de la presa.



CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se proporcionará una breve explicación del funcionamiento y partes de una presa, además de presentar el proyecto PACALORI y como está conformado. Además se trata las bases del diseño de la instrumentación superficial y de los piezómetros en general.

1.1. PRESAS:

Las presas son obras de ingeniería muy importantes para el desarrollo de un país, ya que su objetivo principal es almacenar o derivar las aguas de un río, para utilizarlas en riego, abastecimiento, producción de energía, entre otros usos. La escasez de recursos hídricos influye directamente en el crecimiento económico de una población, ya que limita su nivel de producción. Además el desabastecimiento de agua es una de las mayores necesidades a nivel mundial. Se estima que un billón de personas en el mundo no cuentan con el agua mínima necesaria (50 lt/hab/día) para su subsistencia, mientras que en los países industrializados se puede consumir hasta 10 veces esta cantidad.¹

Las presas se pueden clasificar en dos tipos, según sus materiales de construcción:

- Presas de materiales sueltos (Estructuras deformables)
- Presas de hormigón (Estructuras rígidas)

Las presas de materiales sueltos están formadas por estructuras de tierra y rocas. Pueden ser homogéneas o de varios tipos de suelo que en general le proporcionarán un núcleo impermeable para controlar las filtraciones. Habitualmente los materiales arcillosos son los más utilizados para la construcción de este tipo de presas, pero si el material es limitado, las presas se pueden diseñar con pantallas de hormigón. Las presas de hormigón son costosas y requieren de cimentaciones sólidas por su peso y rigidez. Se construyen de hormigón u hormigón armado y la actividad sísmica es uno de los factores principales a considerar en el diseño de estas presas.²

Las presas según su material y tipo de cortina se sub clasifican en:

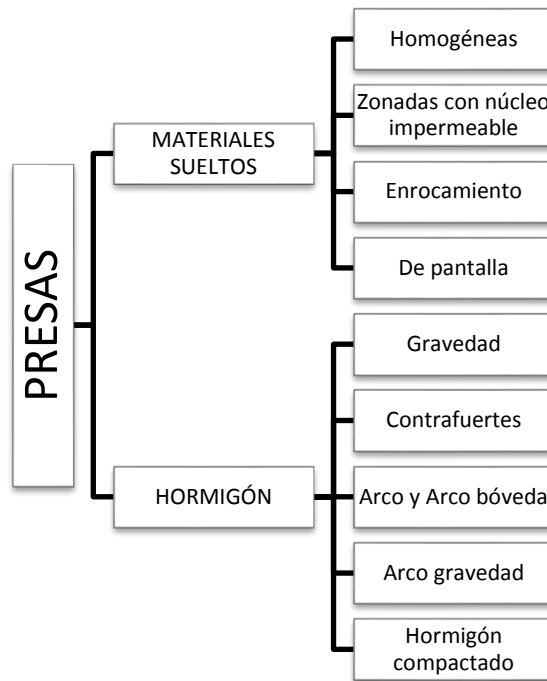


Figura 1.1: Tipos de Presas

1.1.1 Presas de materiales sueltos:

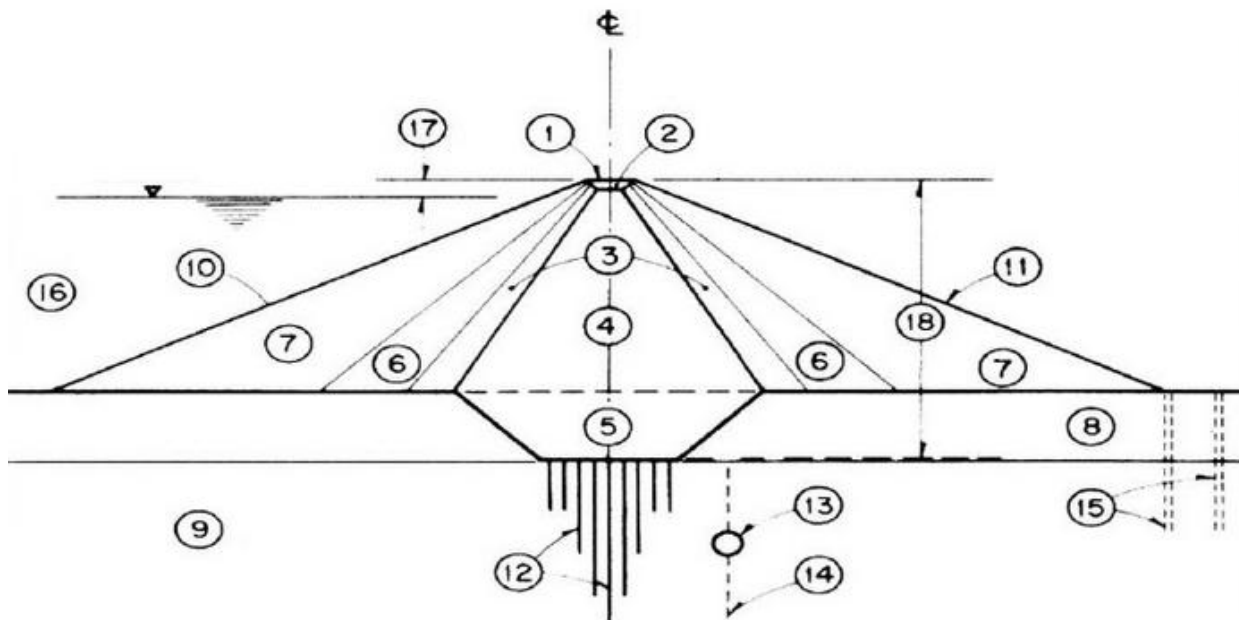
La principal característica de una presa de tierra (presa de materiales sueltos), es el tipo de material usado para su construcción. Estas presas están constituidas por rocas o tierras sueltas como la arcilla, que busca conseguir la impermeabilidad de la presa. En principio la gran mayoría de materiales geológicos son aceptables, excepto los que se pueden alterar, disolver o evolucionar modificando sus propiedades.¹

Las presas homogéneas casi o toda la sección está constituida por el mismo material. Las zonadas con núcleo constan de dos o más tipos de materiales. El núcleo, generalmente de arcilla, ejerce las funciones del elemento impermeable. Las presas de pantalla presentan una lámina delgada que actúa como el elemento impermeable. Los elementos más usados son los hormigones hidráulicos, materiales poliméricos, entre otros.¹

Las presas de enrocamiento tienen en sus materiales fragmentos rocosos de diferentes granulometrías. Estas presas generalmente tienen pantallas o núcleos impermeables para evitar las filtraciones. Estas presas, aunque pesadas, se consideran estables sísmicamente y muy económicas, pero el banco de material debe localizarse cerca del

sitio de construcción. Siempre se debe dar una especial atención a todos los parámetros que contribuyen al deslizamiento y hundimiento del terreno. ²

1.1.2 Partes de una presa de tierra:



- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Cresta o corona. | 10. Talud aguas arriba. |
| 2. Revestimiento de la corona. | 11. Talud aguas abajo. |
| 3. Filtros. | 12. Pantalla de inyecciones. |
| 4. Corazón o núcleo impermeable. | 13. Galería de drenaje. |
| 5. Trinchera o dentellón. | 14. Drenes. |
| 6. Transiciones. | 15. Pozos de alivio. |
| 7. Enrocamientos. | 16. Embalse o vaso. |
| 8. Deposito aluvial. | 17. Bordo Libre. |
| 9. Roca basal. | 18. Altura de la cortina. |

Figura 1.2: Partes de una presa de tierra

Fuente: Presas de Tierra y Enrocamiento. ³

1. Cresta o Corona: Parte superior de la estructura, generalmente revestida para prevenir el secado del corazón impermeable y proporcionar una vía para tránsito de vehículos.
2. Revestimiento de la corona: Dependerá del tipo de uso que se dé a la corona, si es una vía de circulación o no. Generalmente de hormigón.



3. Filtros: Evacúan y controlan las aguas que se filtran a través de la presa.
4. Núcleo: Disminuye el gasto de filtración en secciones mixtas.
5. Trinchera o dentellón: Permite cortar o disminuir el flujo de agua a través de los cimientos.
6. Transiciones: Actúan como filtro, especialmente en el talud aguas abajo, con el objetivo de que el material del filtro se escape hacia la fundación aluvial de la presa.
7. Enrocamientos: Son fragmentos de rocas de varios tamaños cuya función es de estabilidad y protección del talud.
8. Deposito aluvial: Estrato del suelo permeable.
9. Roca Basal: Estrato impermeable del suelo.
10. Talud aguas arriba: Talud de la presa que corta el paso del río para su embalsamiento. Siempre está en permanente contacto con el agua por lo que su situación es más crítica.
11. Talud aguas abajo: Tiene que ser muy fuerte y soportar la infiltración del embalse. En necesario el uso de drenes para su protección.
12. Pantalla de inyecciones: Sustituye al dentellón en cimientos rocosos permeables o cimientos permeables de gran espesor. Se construye inyectando mezclas de cemento y agua que llenan los poros y grietas.
13. Galería de drenaje: Evacuan y controlan las aguas que se filtran a través de las presas. ⁴
14. Drenes: Dren es cualquier dispositivo que facilita la salida de líquidos o exudados al exterior del organismo, es decir el drenaje.
15. Pozos de alivio: Pozos verticales descendentes en la cortina de aguas debajo de la presa para recoger y controlar la filtración a través y bajo la presa.
16. Embalse o vaso: Se denomina embalse a la acumulación de agua producida por una obstrucción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce.
17. Bordo libre: Distancia vertical entre el nivel de la corona y el de aguas máximo extraordinarias (NAME); este último se alcanza cuando el vertedor trabaja a su capacidad límite de descarga.
18. Altura de la cortina: Es la altura total de la presa, incluido el dentellón.

Las presas están regidas por las condiciones del terreno, materiales de construcción, ubicación y presupuesto, por lo tanto no hay dos presas iguales, ya que cada una tendrá diferentes parámetros a ser diseñados y tomados en cuenta para su buen funcionamiento. Las presas juegan un papel muy importante en la economía de los países, es por eso que siempre se busca el diseño más efectivo y seguro para evitar cualquier catástrofe.



1.2 PRESAS DEL PROYECTO PACALORI:

Con el propósito de regular el régimen hidrológico de la cuenca del Guayas, que está conformada por las sub cuencas de los ríos Daule, Vinces (Quevedo) y Babahoyo (Catarama) y que se caracteriza por la secuencia anual de dos estaciones bien marcadas: la época de lluvias, que va de enero a junio, con una producción del 80% de las precipitaciones anuales, y una época seca que va de julio a diciembre, con la producción del 20% restante. La Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) en agosto de 2012 suscribió un contrato de consultoría con la Universidad de Cuenca para que, a través del Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS), se desarrolle la planificación del Proyecto de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos (PACALORI). Dicha planificación engloba las fases de prefactibilidad, factibilidad y diseños definitivos.⁵

El propósito de este proyecto es desarrollar el gran potencial agrícola que caracteriza a la Provincia de Los Ríos, cuyo territorio se encuentra dentro de las subcuencas de los ríos Quevedo y Catarama.⁵

Para el Proyecto PACALORI se diseñaron 13 Presas de Tierra (7 en el Traspase 1 y 6 en el Traspase 2), las cuales están constituidas en su totalidad por suelos limo-arcillosos, llamándolas Presas Homogéneas. Además se encuentran clasificadas en dos grupos: Grandes Presas y Presas Pequeñas. Dicha clasificación corresponde a criterios de Altura y Volúmenes de Embalse. Las Grandes Presas son aquellas que tienen alturas mayores o iguales a 15 metros y/o volúmenes de embalse mayores a 50 hectómetros cúbicos; aquellas presas que estén por debajo de estos valores mencionados se las considera Presas Pequeñas.⁶

Por lo tanto las 13 presas del proyecto PACALORI se pueden clasificar de la siguiente manera:

Tipo de Presa	Presa	Volumen de Embalse (x10 ⁶ m ³)	*Altura (m)
PRESAS PEQUEÑAS	Chojampe 2	19.4	13.0
	La Angostura	39.2	14.0
	Estero Lechugal	13.4	8.0

Tabla 1.1: Clasificación Presas Pequeñas Proyecto PACALORI
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2014.



Tipo de Presa	Presa	Volumen de Embalse (x10 ⁶ m ³)	*Altura (m)
GRANDES PRESAS	Macul 1	57.0	21.0
	Maculillo	136.0	23.0
	Macul 2	51.4	17.0
	Pueblo Viejo	86.0	14.0
	Mangas Saibas	180.0	15.0
	Mocache	18.7	19.0
	Garzas	45.6	22.0
	Aguacatal	18.5	15.0
	Lechugal 2	70.0	20.0
	Chojampe	105.0	13.0

Tabla 1.2: Clasificación Grandes Presas Proyecto PACALORI
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2014.

Las obras anexas consisten en obras complementarias necesarias para el funcionamiento de las presas. Siendo éstas estructuras de evacuación. Estas estructuras incluyen: vertedero(s) de excesos, rápida y cuenco dissipador, túneles de desvío, el desagüe de fondo, la estructura de toma (caudal de riego y caudal ecológico) y las correspondientes ataguías.⁶

De igual manera, para la construcción y el correcto funcionamiento de las presas son necesarias otras obras anexas, como el control y monitoreo de la estabilidad de los taludes y la masa en sí de cada presa. Además que previenen fallas estructurales y de filtraciones excesivas que pueden provocar grandes desastres como el colapso de una presa. La idea principal es que cualquier eventualidad pueda ser alertada y controlada a tiempo, para que las personas encargadas del monitoreo puedan tomar acciones correctivas o de mantenimiento, y así evitar un inconveniente mayor.

Estas obras de control y monitoreo son parte del estudio de Instrumentación geotécnica para las presas. En ellas se incluirá tipos de instrumentos para las presas y las bermas, ubicación, funcionamiento y toma y análisis de datos, entre otras cosas.

Aunque las presas son muy similares en sus características, el diseño de la instrumentación varía para cada una de ellas, pero en general, lo mínimo que se plantea instalar para un control adecuado son piezómetros y monumentos de control topográfico.



Para el diseño de la instrumentación es necesario contar con la ubicación de las presas con una topografía de alta calidad, además de los mapas de corriente superior del análisis de la estabilidad de taludes y el estudio de la geofísica de los suelos del lugar del emplazamiento de cada presa donde lo principal es conocer cuáles de ellas tienen suelos compresibles, y así determinar qué tipo de instrumentación y cuántos instrumentos tienen que ir en cada presa.

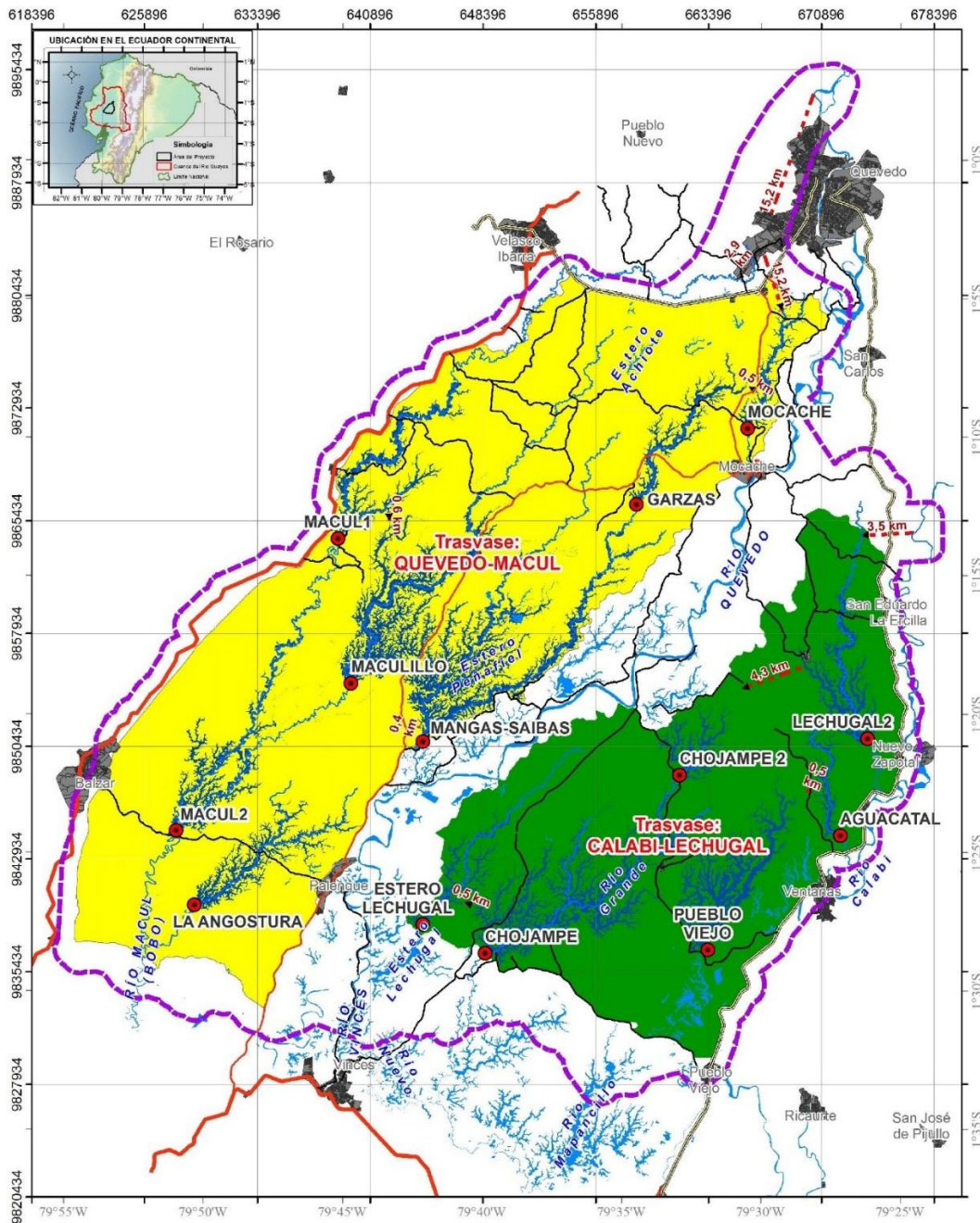


Figura 1.3: Límites del Proyecto PACALORI
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013.



1.3 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN:

El principal objetivo de la instrumentación es la auscultación de una obra. Esto quiere decir que es necesario verificar el correcto funcionamiento de la misma. El sistema tiene que funcionar de tal manera que brinde alertas tempranas para evitar una catástrofe. Los proyectistas se ven con la necesidad de diseñar cada vez obras más altas y grandes. Esta obra “Es una estructura creada por el hombre para que preste un servicio al ser humano, como ente social” ⁷, por lo tanto el riesgo de fracaso debe ser mínimo y siempre contar con un factor de seguridad estable y seguro.

En este caso mediante la colocación de los dispositivos de auscultación (instrumentación) se pretende controlar aquellos parámetros más importantes del comportamiento de las presas y sus cimientos, detectar la aparición de anomalías que pueden comprometer la seguridad de la obra. Los parámetros que mejor reflejan dicho comportamiento son: movimientos, deformaciones, presiones de agua, filtraciones, deterioro de los materiales constituyentes de la presa. ⁸

Con los planos definitivos de la geometría de la presa y estructuras singulares, así como los condicionantes geológicos-geotécnicos, se diseñara un plan de auscultación adecuado a las características y entidad de la infraestructura, buscando siempre mantener los siguientes parámetros:

En el proyecto y construcción se emplearán los últimos conocimientos existentes en el arte de la construcción en un análisis del estado tecnológico.

La obra debe contribuir al aprovechamiento de los recursos existentes, ya sea estos de espacio, energéticos, económicos, etc. Contribuyendo a la solución de problemas de interés general.⁷

Cabe recalcar que en las presas, la información recolectada por la instrumentación se interpreta en un papel doble, ya que indica la validez de las hipótesis del diseño y el funcionamiento real de la presa.

Así como las presas deben ser auscultadas, La instrumentación debe ser monitoreada, evaluada, mantenida y los datos deben ser comparados con las lecturas previas y con los valores de diseño esperados. Junto con todas las descripciones de instrumentos deben incluirse sus datos iniciales, límites de diseño, fechas y requerimiento para calibración, rangos de operación normal, y niveles de “alarma”, punto en el cual se requiere un examen detallado de las lecturas.⁹



Los principales instrumentos para el monitoreo de una presa son piezómetros, inclinómetros, celdas de presión y testigos superficiales. Todos estos instrumentos se deben colocar según los requerimientos de control necesarios planteados en el diseño del proyecto. Por lo que su selección, cantidad y ubicación serán determinadas para obtener datos y resultados suficientes y de calidad.

1.4 PIEZÓMETROS:

Los piezómetros son instrumentos utilizados para medir presiones de agua durante la construcción y funcionamiento de una presa, también se utiliza para medir el nivel de la superficie freática producida por la infiltración del agua a través de los taludes y cimientos relativamente permeables de la estructura. El aumento excesivo de la presión hidrostática puede ser muy riesgoso por lo que el uso de un piezómetro es necesario para conocer dichos aumentos.^{10 11}

Los piezómetros tienen varias aplicaciones como:

- Monitoreo de la presión de poros para determinar el coeficiente de seguridad en presas, rellenos, excavaciones o taludes.
- Monitorear la presión del agua para la evaluación de la estabilidad de contrafuertes o terraplenes.
- Monitoreo de sistemas de drenaje.

Para todas estas aplicaciones existen varios tipos de piezómetros que pueden ser utilizados a través de los años. La tecnología ha influenciado de una manera importante su desarrollo y forma de recolección de datos. Pero la economía es el factor determinante en la selección del mismo, además de la función que se le vaya a otorgar.

Los equipos se pueden clasificar en:

- Abiertos como el de Casagrande y
- Cerrados como el hidráulico y el eléctrico.

Es necesario recalcar que cualquier tipo de piezómetro estará regido por sus limitaciones, por lo tanto los fabricantes de estos aparatos deben entregar todos los requerimientos, funcionalidades, forma de instalación y dar capacitaciones en la toma de medidas. Desde el inicio de su funcionamiento, un piezómetro debe estar correctamente calibrado y tener un plan o procedimiento de su uso durante la explotación de la obra. De igual manera se debe tener un programa de re calibración y mantenimiento a toda la instrumentación instalada, y así poder asegurar que los datos obtenidos durante el monitoreo son reales, por lo tanto podrán ser usados.



1.5 INSTRUMENTACIÓN A BASE DE TESTIGOS SUPERFICIALES:

Todas las obras en general inician con un reconocimiento topográfico de donde se obtienen datos para la factibilidad, diseño y construcción de cualquier proyecto. En el caso de presas es necesario tener presente toda la información disponible, ya que la topografía es un puntal fundamental que proyectara el diseño, guiará la construcción y vigilará el funcionamiento de la obra con métodos e instrumentación básica pero necesaria.

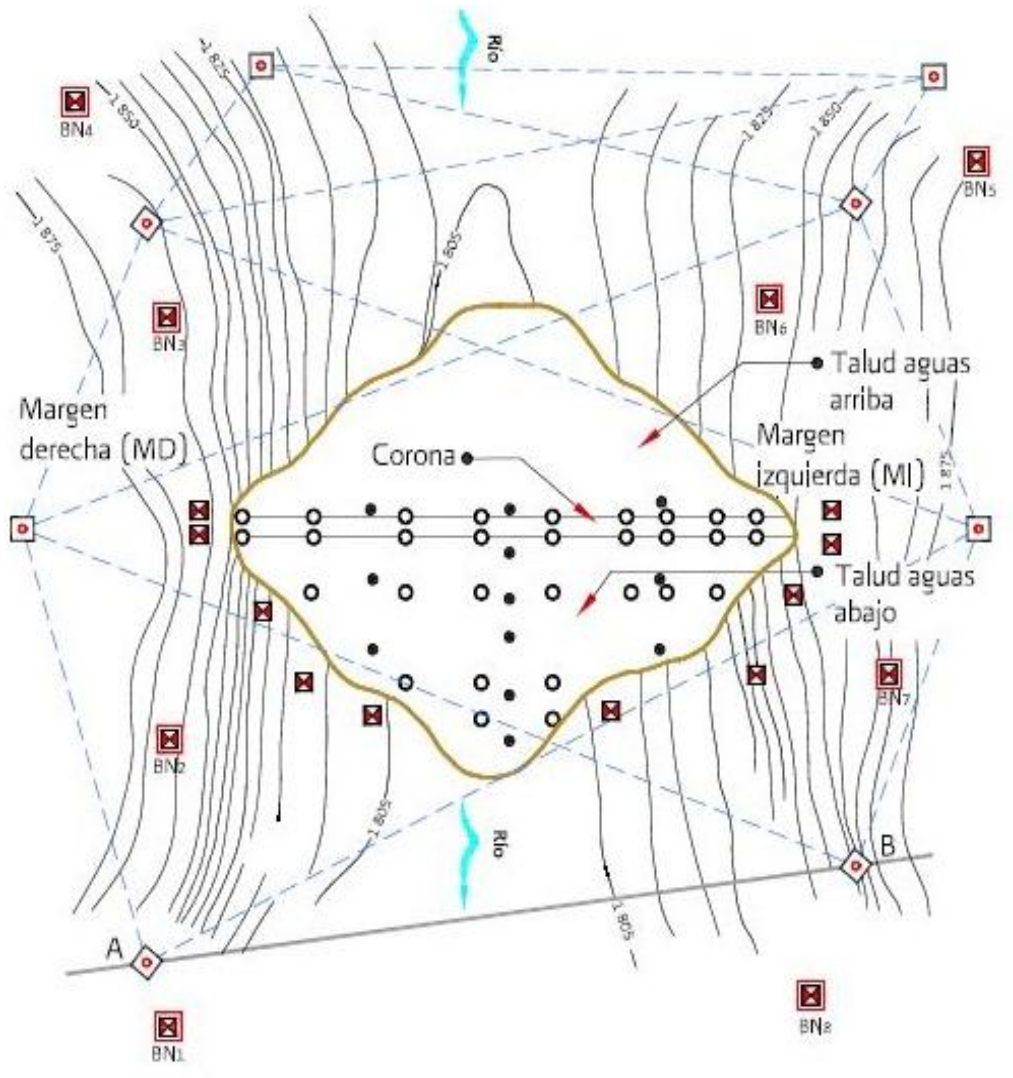
En la presas de tierra en general se presentarán movimientos superficiales en cualquier dirección, por lo que es necesario contar con herramientas que hagan posible la medición y cálculo de los mismos, de una manera rápida y efectiva. Dependerá mucho del tipo de proyecto y su importancia para escoger tipos de herramientas que variarán en eficiencia y precisión. Los equipos que se pueden usar para la obtención de estos movimientos son teodolitos, estaciones totales, distanciómetros, GPS, etc.¹²

Para el proyecto PACALORI se plantea usar instrumentación superficial, ya que es sencilla, confiable y económica. Consiste en usar procedimientos topográficos para observar los movimientos que se pueden presentar en una obra. Estos valores siempre serán comparados con puntos fijos previamente establecidos fuera de la influencia de la obra.

Los datos que se obtienen con este tipo de mediciones son:

- Medición de desplazamientos horizontales.
- Medición de desplazamientos verticales.
- Medición de distancia entre testigos.
- Medición mediante triangulación para el apoyo del control topográfico de la obra.

En general el control y monitoreo con hitos superficiales permitirá la recolección de información mediante mediciones para un análisis cualitativo y cuantitativo en la estructura de la presa. En el caso del proyecto PACALORI todas las presas son de tierra y por lo tanto sus deformaciones se consideran permanentes, producidas por el peso mismo de la presa y la presión hidrostática de agua del reservorio. Pero cualquier indicar de un comportamiento anormal que afecte la geometría y estabilidad de la presa deberá ser notificado al ente de control para su debida inspección y la toma de decisiones respecto al procedimiento a seguir. Dependiendo del tipo y condición de la estructura, los sistemas de monitoreo deben cumplir con la condición de medir movimientos de corta y larga duración ya que la es la única forma de conocer este tipo de problemas, es mediante mediciones periódicas, esto quiere decir que el periodo de tiempo de control tiene que ser el de diseño de la vida de la estructura de tierra.



Simbología

- Radlaclones
- Línea base A,B
- Banco de nivel- BN# 1 (Red primaria)
- Banco de nivel (Red secundaria)
- Banco de referencia para control horizontal (BRCH)
- Testigo superficial para movimiento vertical (TSMV)
- Testigo superficial para movimiento horizontal (TSMH)

Figura 1.4: Ubicación referencial de monumentos para control topográfico.
Fuente: Manual De Mecánica De Suelos – CONAGUA ¹²



1.6 ESTABILIDAD DE TALUDES Y PRESIÓN DE POROS EN PRESAS DE TIERRA

1.6.1 Estabilidad de Taludes en presas de tierra:

Para el estudio del proyecto de instrumentación de cualquier presa de tierra, es necesario conocer los parámetros que afectan la estabilidad de taludes, ya que estos determinarán el tipo de instrumentos a utilizar, su ubicación y el tipo de control que será necesario durante el funcionamiento de la presa. Esto quiere decir que dependiendo de cómo estén conformados los taludes de la presa y de los estribos, puede ser necesario el uso de una cantidad mayor de instrumentos o de otro tipo como los inclinómetros. Pero esto también se determinará por los estudios previos de geotecnia realizados en el diseño de la presa. Tener estos conceptos claros sirve para que el técnico encargado del control y toma de datos de la instrumentación pueda realizar un análisis visual y práctico del entorno de la presa y entender cómo se están comportando las masas de tierra, verificar si existe algún detalle o problema o dar una alerta temprana en caso de alguna emergencia.

En la actualidad el diseño de taludes para obras de infraestructura, se ha convertido en uno de los aspectos más importantes en la ingeniería geológica, ya que el talud al ser una estructura compleja de analizar, es necesario en su estudio resolver problemas de mecánica de suelos y rocas. Además la geología aplicada debe formular un criterio aceptable para presentar un diseño seguro y económico a la vez.

Los taludes permanentes para la construcción de infraestructuras o con fines de edificación se diseñan para ser estables a largo plazo, precisando medidas de estabilización complementarias cuando no sea posible realizar las excavaciones o terraplenes con los ángulos y alturas requeridas, por motivos económicos o de otro tipo.¹

En la ingeniería civil la tolerancia de movimientos de los taludes son muy restrictivas, al poder afectar a las estructuras que se construyen, primando los criterios de seguridad.

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio.¹³

La estabilidad de un talud está determinada por:



Factores Condicionantes	Factores desencadenantes
<ul style="list-style-type: none"> - Estratigrafía y litología. - Estructura geológica. - Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales. - Propiedades físicas, resistentes y demorfacionales. - Tensiones naturales y estado tenso-deformacional. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecargas estáticas. - Cargas dinámicas. - Cambios en las condiciones hidrogeológicas y Factores climáticos. - Variaciones en la geometría. - Reducción de parámetros resistentes.

Tabla 1.3: Factores influyentes en la inestabilidad de los Taludes.

Fuente: Luis Gonzales de Vallejo, Ingeniería Geológica.- 2004 ¹

La combinación de los factores de la tabla anterior, pueden determinar las condiciones de rotura en una superficie o a lo largo de varias de ellas, así el movimiento de un volumen de suelo o rocas es cinemáticamente posible. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos.¹

En la etapa de prefactibilidad del proyecto PACALORI, se realizaron perforaciones para conocer los materiales que compondrían las presas y el estrato donde se asentarán. Según el tomo 7 de obras civiles ⁶, el terraplén está compuesto por material limo – arenoso y el estrato de asiento está constituido por material heterogéneo formado por limos, arenas compactas, arcillas, arena limosa, gravas subredondeadas, entre otros; que llegan hasta una profundidad de 9m. El estrato más bajo que alcanza un espesor de 6 m, está compuesto por areniscas. Hasta aquí se pretende que lleguen las posibles superficies de falla por sus altos valores de cohesión y fricción.

En la prefactibilidad se usaron 3 métodos (Fellenius, Janbu y Bishop) para encontrar un rango de valores para el factor de seguridad y así buscar un valor confiable para ser aplicado en el diseño definitivo de las etapas de construcción y funcionamiento. Estos datos se obtuvieron con los parámetros pre establecidos y la ayuda del software SLOPE/W.

Para calcular la LCS (Línea de corriente superior) se utilizó en cambio el software SEEP/W para delimitar las zonas saturadas y no saturadas que constituyen la presa. La ubicación de la LCS es muy importante determinar, y así pre diseñar la ubicación de cualquier instrumentación necesaria en la presa.

Los datos analizados en estos programas computacionales dan una respuesta gráfica que ayuda a visualizar al proyectista de una manera clara donde se puede producir un

deslizamiento, por donde circula la LCS y por ende donde se encuentran las zonas saturadas y de riesgo en una presa. Toda la geometría previamente revisada y los parámetros de los materiales de la presa y la cimentación también se grafican. De igual manera las cotas ayudan a la ubicación y cálculo de distancias necesarias para las debidas correcciones. En la siguiente figura se puede apreciar un ejemplo de lo expuesto anteriormente.

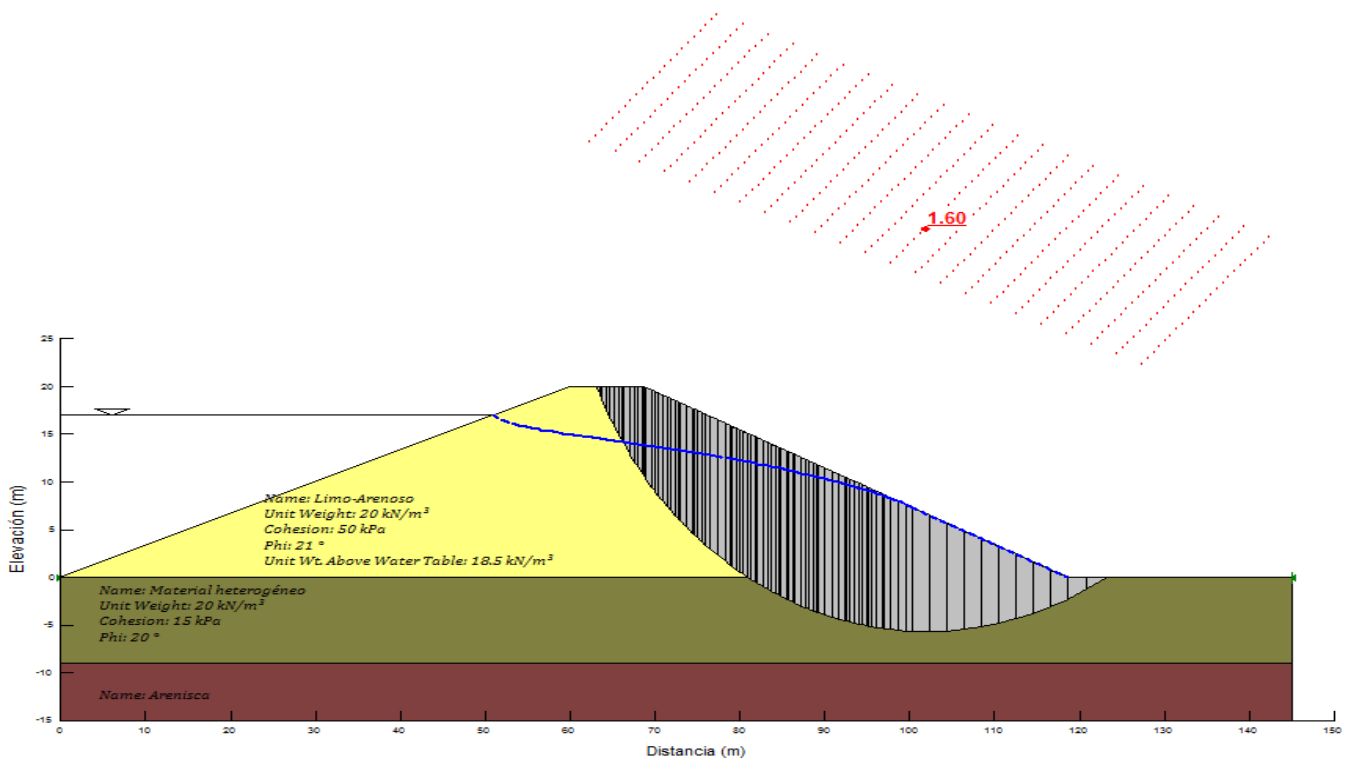


Figura 1.5: Factor de seguridad para el método de Fellenius. Presa Lechugal 2.
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013.

1.6.2 Presión de poros en presas de tierra:

La presión de poros es la presión interna del agua de saturación. La presión de poros dentro del suelo depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos y las características geológicas del sitio. La presión de poros varía de acuerdo a las variaciones del régimen del agua del embalse. Los incrementos de presión pueden ocurrir rápidamente en el momento de una lluvia, dependiendo de la intensidad de la lluvia, de la rata de infiltración del área tributaria, etc. Un incremento en la presión de poros positiva o una disminución de la presión negativa, equivale a una reducción de resistencia al cortante y de la estabilidad.



El valor de las presiones de poro se mide utilizando piezómetros abiertos o neumáticos. Si no hay flujo de agua la presión es hidrostática y la medida del piezómetro coincide con el nivel freático, pero si existe flujo las presiones no son hidrostáticas. En este último caso la presión de poros en cualquier punto dentro de la masa de suelo puede pronosticarse por medio de las redes de flujo. Debe tenerse en cuenta el efecto que las discontinuidades tienen en los niveles piezométricos, determinados por las líneas equipotenciales. Las discontinuidades generan diferencias de permeabilidad, las cuales controlan el sistema de presiones dentro del talud.

Para el análisis de presiones de poros sobre una superficie de falla se deben tener en cuenta sus condiciones de drenaje. Cuando existe drenaje, la presión de poros disminuye hacia la superficie del talud, pero cuando el drenaje es deficiente se puede presentar un aumento importante de la presión de poros en el pie del talud.

La localización del nivel freático corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. El nivel de agua determina los niveles de presiones hidrostáticas sobre una superficie localizada por debajo de ese nivel o los valores de presión negativa o de succión para el suelo por encima. En taludes naturales de laderas, la línea de nivel freático general sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno y esta sube por el recargue debido a la infiltración.

El agua subsuperficial puede dividirse entre zonas de presión de poros positiva y negativa. Las presiones de poro positivas son superiores y las negativas son inferiores a la presión atmosférica. La línea divisoria es el nivel freático donde la presión es igual a la presión atmosférica, la cual se designa como presión cero.

Por debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado, lo cual equivale a que el agua llena todos los poros de los suelos y todas las cavidades de los materiales infrayacentes. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática y su superficie superior es el nivel freático. Cuando las circunstancias geológicas y topográficas son más complejas podrá haber más de una zona de saturación y, por consiguiente, más de un nivel freático en una localidad determinada.

En el análisis de estabilidad es muy importante definir el nivel de agua y las consiguientes condiciones de saturación y presiones de poros. Un talud seco puede ser estable, mientras el mismo talud puede no ser estable con un determinado nivel freático o un talud estable puede fallar al ascender el nivel freático. En el caso de taludes importantes es necesaria la colocación de piezómetros para poder cuantificar el valor de la presión de poros que puede definir, en un determinado momento la estabilidad o inestabilidad del talud.



CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo se refiere a la elaboración del proyecto de instrumentación para la presa de tierra Lechugal 2 perteneciente al trasvase 2. Se realiza un análisis determinativo para escoger tipos de monumentos e instrumentos según las condiciones que presenta el proyecto. Todas las presas del PACALORI están diseñadas bajo las mismas condiciones por lo que el siguiente estudio de instrumentación será la base para la elaboración del resto de proyectos de instrumentación.

2.1. ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN

La construcción de toda obra de ingeniería civil produce un cambio en el campo de esfuerzos en el terreno, lo cual provoca una redistribución de esfuerzos y deformaciones. Por tanto, toda estructura que se desplanta en el terreno causa una interacción entre terreno y estructura. El ingeniero en las etapas de análisis y diseño de una obra cuenta con dos aliados: su experiencia y el poderío de los métodos numéricos de análisis, la predicción. Sin embargo, los contrastes entre la teoría y la realidad son extremadamente complejas, sobre todo en la Mecánica de Suelos Aplicada. El diseño en ingeniería se puede definir como la toma de decisiones de cara a la incertidumbre con grandes penalizaciones para el error. Por tanto, se requiere otro aliado, aquel que confirme los supuestos y las decisiones, que compruebe que el comportamiento real de la obra esté en concordancia con las predicciones basadas en los criterios de diseño o que aporte los argumentos para introducir modificaciones o cambios importantes. Un aliado que imparcialmente confronte la predicción con la realidad, la observación.

2.2 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS:

Hay que tener en cuenta que la infiltración en una presa de materiales sueltos, se produce en la cimentación y el cuerpo de la presa, causando algunos efectos como la pérdida de agua, presiones internas y el arrastre de materiales finos por el paso del agua produciendo erosión interna. Este último efecto llamado sifonamiento o piping es el más peligroso y difícil de controlar, ya que afecta directamente a la integridad de la presa.



El segundo más importante sería la presión intersticial ya que es más controlable con dispositivos adecuados y en cierto punto previsible en los cálculos de estabilidad.

Como se mencionó anteriormente se debe analizar la cimentación y el cuerpo de la presa, ya que cada una presenta diferentes infiltraciones.

En la cimentación es necesario asegurar que cumplan ciertas condiciones de seguridad para su correcto funcionamiento. Cabe recalcar que su principal función es de proporcionar estabilidad al cuerpo de la presa en todas las condiciones posible, tales como de saturación y de carga.

Las cimentaciones se deberán analizar según el tipo de suelo en el que se van a asentar. Pueden ser de roca, arena y grava, limos y arcillas. Cada una de estas tendrá un tratamiento diferente para evitar filtraciones excesivas, pérdida de agua en grandes cantidades, sifonamiento o estabilidad.

Para el diseño de la instrumentación de la presa de Lechugal 2 se han tomado los planos realizados por los proyectistas del PROMAS para encontrar las secciones más importantes y necesarias de control durante la construcción y explotación de la presa, y de estas obtener la línea de corriente superior (LCS), afán de conocer la ubicación necesaria de los piezómetros en este caso.

Analizando el tipo de presa, la importancia, ubicación, funcionamiento y economía se ha previsto colocar piezómetros en 3 cortes transversales de Lechugal 2. Estos ejes se encuentran en lugares estratégicos, como son: el cauce del río (medio de la presa), al lado de la obra de toma (margen izquierdo de la presa) y un corte al margen derecho de la presa. Considerando la longitud de la presa, que estará formado por material homogéneo y pensando en la economía del proyecto de instrumentación, pero también en su seguridad, se escogieron estos 3 lugares que deben ser los mínimos para obtener datos relevantes en el monitoreo de la presa.

Como se observa en la Figura 2.1 los ejes atravesarían el cuerpo de la presa de manera transversal y define los puntos de cortes necesarios para obtener la LCS en ubicaciones específicas para conocer cómo se mueve el agua a través de estas secciones. Es de suma importancia conocer estos datos ya que facilitará ubicar los piezómetros y calcular el número de instrumentos que se van a necesitar para obtener un adecuado control.

Con las LCS definidas (Ver Figura 2.2) en los cortes transversales seleccionados se puede ubicar los ejes piezométricos en el talud aguas debajo de la presa, ya que aquí es donde se produce el mayor riesgo de sifonamiento y de inestabilidad de la presa.

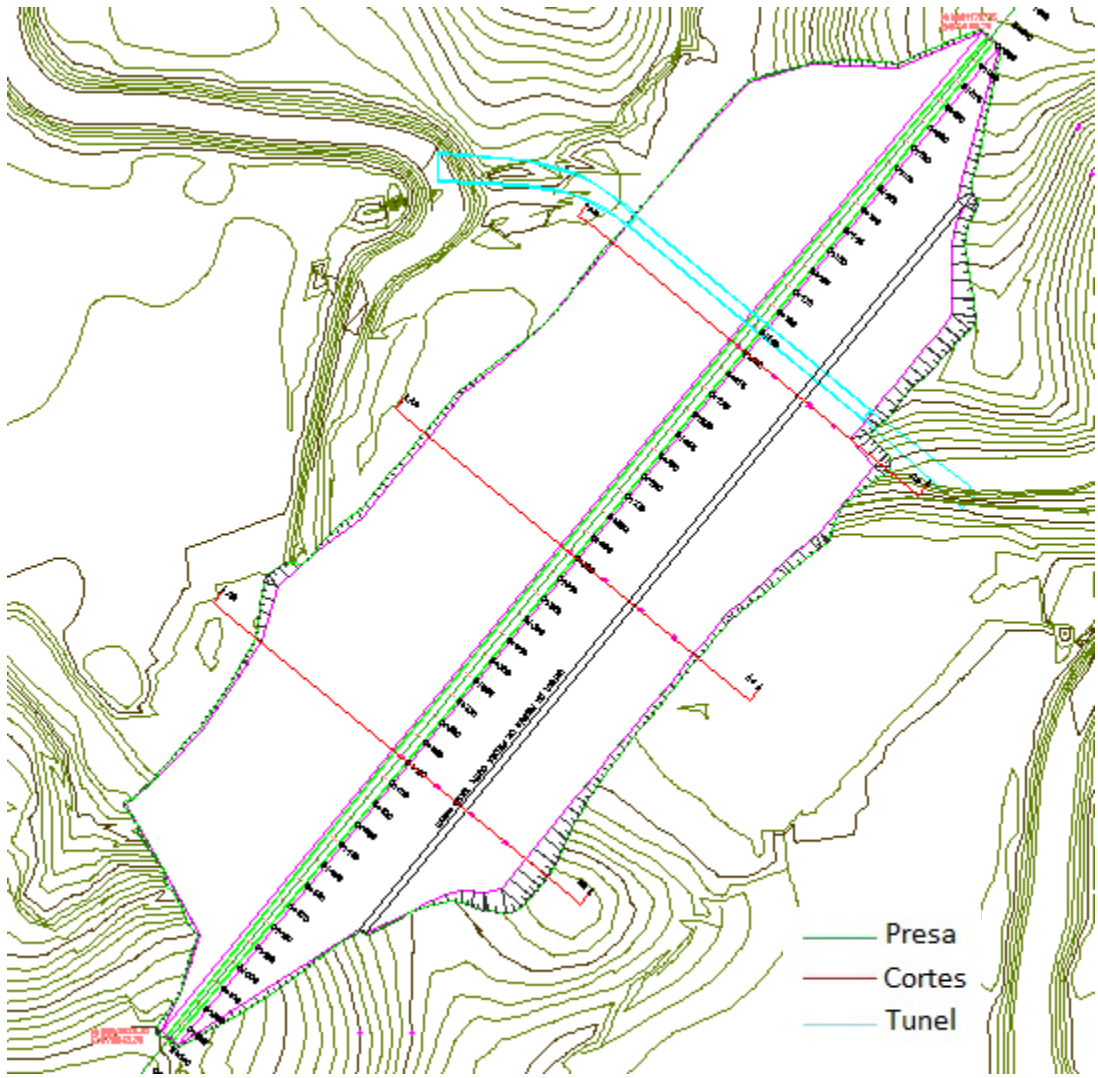


Figura 2.1: Mapa de ubicación de los cortes transversales.

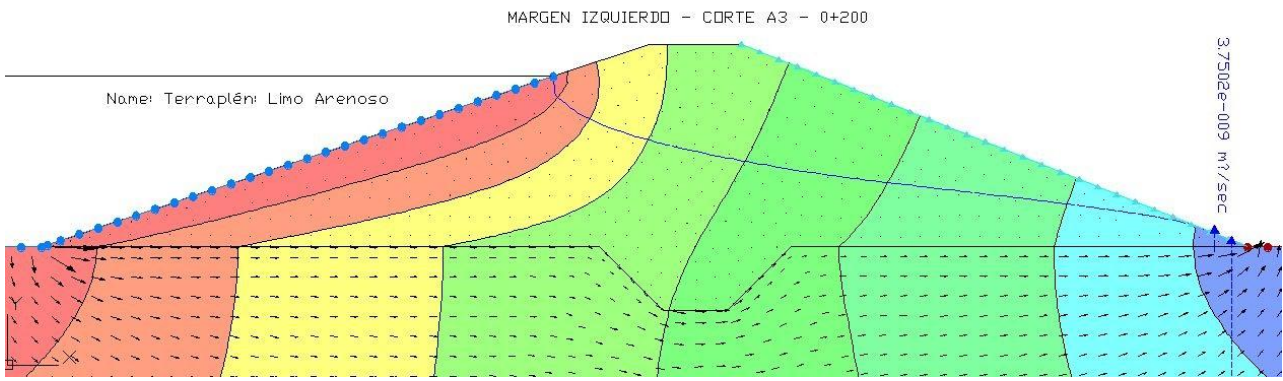


Figura 2.2: Línea de corriente superior – Presa Lechugal 2 – Corte A3 – 0+200
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2014.

Luego de un análisis de la geometría de los cortes, incluyendo la LCS se encontraron 5 puntos sensibles que deben ser controlados mediante piezómetros. Estos puntos están ubicados en los ejes piezométricos que se muestran en la Figura 2.3 y se los ha ubicado en esa posición por las siguientes razones:

1. En el eje de la presa, ya que desde ese punto hacia aguas abajo el efecto del piping o sifonamiento puede tener mayor efecto. Además se considera como sección crítica la parte más alta de la presa.
2. El dentellón, una parte esencial para la estabilidad, debe soportar el peso del cuerpo de la presa, además de estar afectado directamente por la infiltración proveniente del suelo de la cimentación, ya que su función es disminuir el flujo de agua a través del cimient. ⁴
3. En la berma porque da estabilidad a la presa y reduce la velocidad de las aguas que escurren sobre las superficies del talud aguas abajo. Además contará con una cuneta.
4. Salida de la banqueta de drenaje, donde también se instalarán pozos de alivio. Es una zona de escape de la infiltración proveniente de los cimientos y el cuerpo de la presa.
5. Cimientos, específicamente donde se considere la existencia de lentes de arena. La profundidad de estos lentes será variable y tendrá que tomarse en cuenta durante la construcción de la presa.

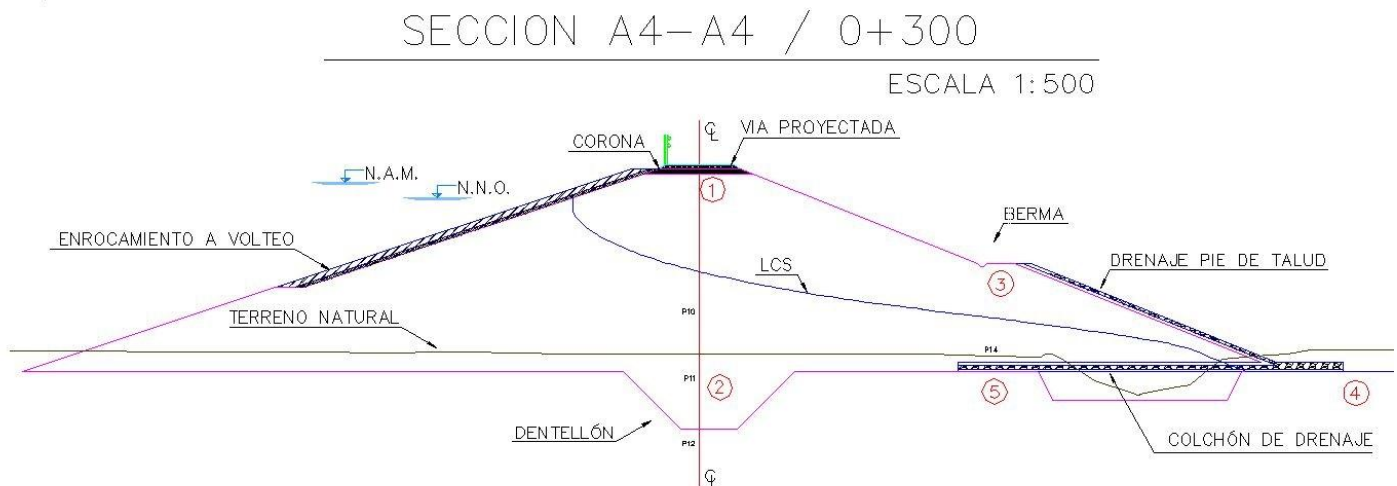


Figura 2.3: Zonas críticas de la presa Lechugal 2.

Los piezómetros se ubicarán con respecto a la LCS, por lo que la distancia máxima sobre esta será de 1 metro. Ya que si presión aumenta con la infiltración y la LCS sube, la respuesta de los piezómetros puede ser muy lenta al dar una señal de lo que está ocurriendo. Esta será una regla básica y obligatoria para el diseño de los proyectos de instrumentación de las presas del PACALORI.

Enfocándonos directamente en la presa de Lechugal 2 del se encontraron los siguientes datos que entregan una perspectiva más clara de lo que puede existir en las fundaciones de las presas. Hay que recalcar que a la fecha recién se están analizando los resultados de las exploraciones realizadas en las zonas de construcción de las presas. De igual manera será recomendable para el constructor realizar sus propios análisis y exploraciones de manera complementaria a los obtenidos en los primeros estudios, y así tener información suficiente y de calidad para la construcción del proyecto.

Para obtener el perfil estratigráfico de Lechugal 2 se realizaron 5 sondeos (Ver Figura: 2.4) con los cuales se crearon un perfil preliminar de evaluación que dio los siguientes resultados según el informe del componente geología y geotecnia de la fase de factibilidad, trasvase 2¹⁴, se encontraron 3 capas compuestas básicamente de limos y arenas finas en el lugar de emplazamiento de la presa.

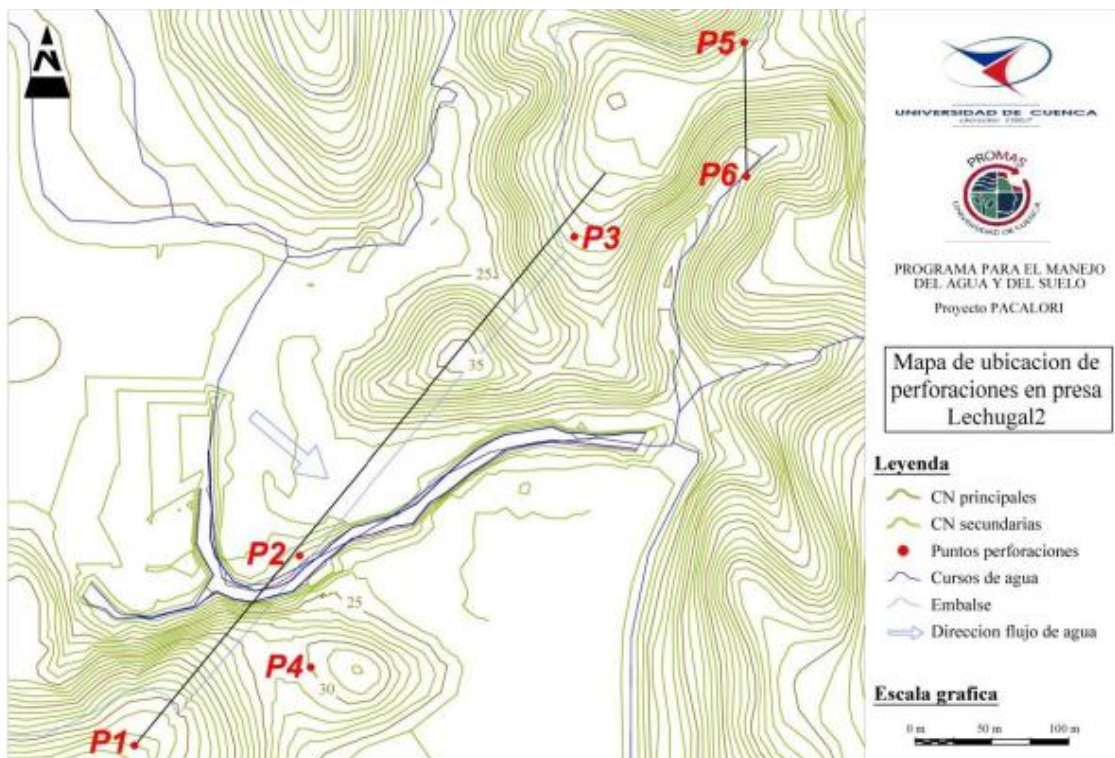


Figura 2.4: Mapa ubicación de perforaciones – Presa Lechugal 2.
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013.

En el Informe de Factibilidad se detalla un pequeño resumen de las perforaciones (Ver Figura: 2.5) recogiendo datos de profundidad, ubicación y tipo de materiales encontrados, además de presentar el registro fotográfico de los materiales extraídos.



Figura 2.5: Perforación presa Lechugal 2 – Sondeo 1
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013.

Al final se entrega una interpretación Geológica – Geotécnica que en resumen dice lo siguiente:

- La primera capa que corresponde a la superficial, está afectada por la meteorización, tiene un espesor variable y está comprendida de limos de plasticidad moderada a alta y una consistencia baja a moderada.
- La segunda capa contiene limos de plasticidad baja a moderada y es una capa más compacta.
- En la tercera capa se encontró arenas aluviales interestratificada entre limos de alta y baja plasticidad.

Estos lentes de arena que pueden existir son los que realmente importan en el diseño de la instrumentación y de los cuales deberá tener un especial cuidado, ya que el agua buscará estos caminos para infiltrarse de una manera más rápida.

Es por eso que se encuentra necesario realizar sondeos extras durante la fase de construcción de la presa para saber dónde colocar piezómetros eléctricos en las zonas de lentes de arena, y así obtener respuestas rápidas e inmediatas en aumentos de la presión de poros e infiltraciones excesivas.

Como se aprecia en la Figura 2.6, de los planos entregados en la etapa de Factibilidad se aprecia claramente donde se encuentran estos lentes de arena. Por lo tanto de debe asumir que pueden encontrarse a lo largo y/o ancho de toda la presa y es por eso la ubicación necesaria de piezómetros en estas zonas.

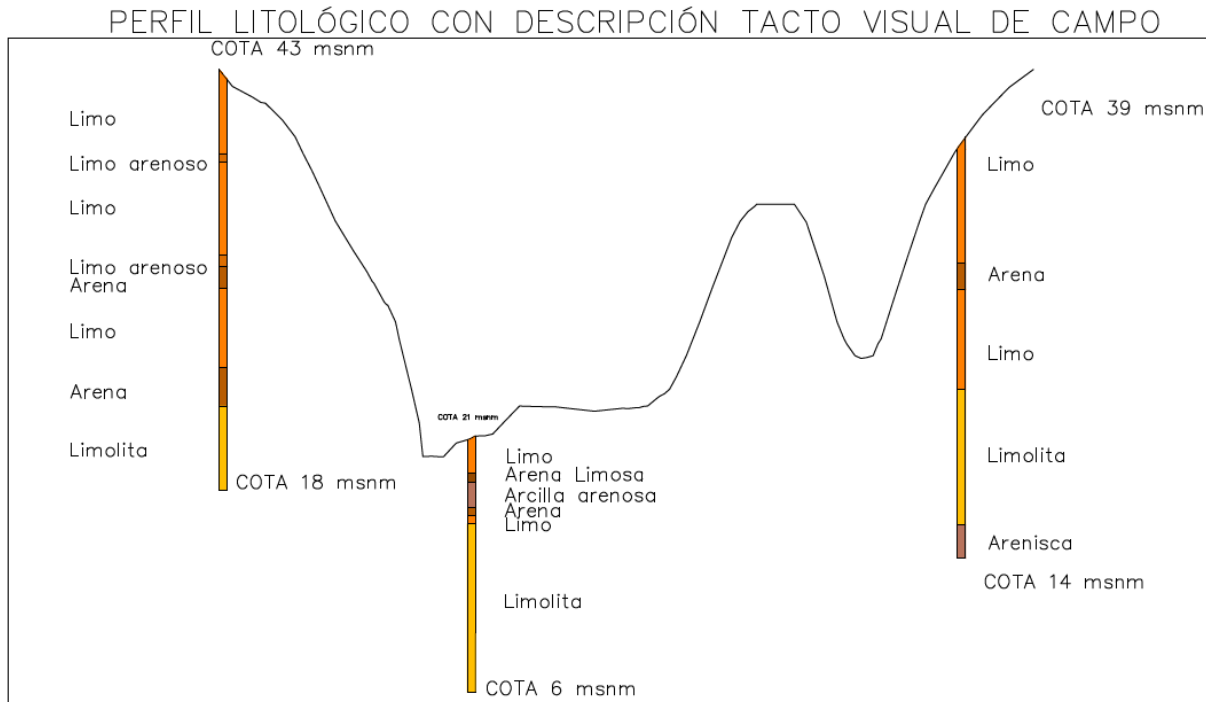


Figura 2.6: Perfil Litológico del cierre de la Presa Lechugal 2.
Elaboración: PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013.

2.2.1. Tipos de piezómetros para medir la presión de poros:

2.2.1.1 Piezómetro de Casagrande

Piezómetros de Casagrande pueden usarse para la medición del nivel freático respecto a la superficie de la tierra, presión de agua en terraplenes, fundaciones, presas, o en sitios seleccionados. Está formado por un tubo plástico o de metal y con una piedra porosa en su base. Se puede usar con un limnómetro o un manómetro en la cabeza para registrar el nivel del agua. Entre las ventajas son sus simplicidad, su costo de instalación barato, su adaptabilidad, no requiere mantenimiento y sus datos pueden usarse prácticamente con poco o ningún cálculo matemático. En las desventajas podemos decir, que las perforaciones son caras, el tiempo de lectura e relativamente largo y durante la construcción puede ser golpeado e interferir con el equipo. ¹⁰

Según Rivas ¹⁵ el tubo utilizado debe tener un diámetro recomendado de 12 mm para que las burbujas de aire puedan subir libremente sin obstruirlo. Otras de las exigencias, son que el tubo debe colocarse lo más verticalmente posible. Así evitar cualquier inconveniente o desperfecto. Una de sus limitaciones es que no se pueden usar en ciertas zonas de las presas donde tengan grandes deformaciones.

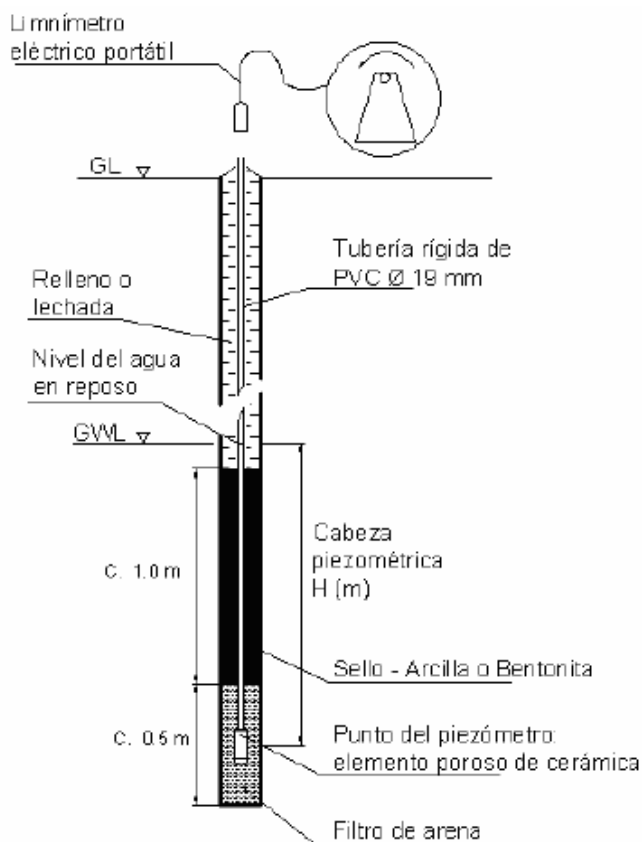


Figura 2.7: Piezómetro de tipo de tubo vertical de Casagrande, utilizado en perforaciones.
Fuente: Adaptado de Estructuras Hidráulicas, P. Novak - 2001. ⁹

2.2.1.2 Piezómetros Hidráulicos:

Estos piezómetros que sirven para medir la presión de poros, es más efectivo que los anteriores a pesar que tiene algunas similitudes. La presión del agua se detecta por la parte inferior donde se encuentra la punta porosa y de ahí el agua es conducida hacia la zona de lectura. La variación se puede registrar con un manómetro de mercurio.

Los más utilizados son los de tubos gemelos, los cuales están interconectados y permitiendo el paso del agua. La zona de medición o lectura tiene unos tubos de PVC de diámetro pequeño llenos de líquido (aceite o agua).

Una de las principales ventajas de estos piezómetros es que pueden medir presiones negativas (con capacidad limitada) en terrenos compactados. Otras ventajas son que las sondas hidráulicas se pueden colocar a grandes distancias (> 200 m), los tiempos de medición son mucho menor comparados con los sistemas abiertos. También son más robustas, por lo tanto menos propensas a daños durante la construcción de la presa. Como desventajas, necesitan instalaciones especializadas que son complejas y delicadas como los manómetros y dispositivos de presión. Se debe incluir la construcción de una caseta donde se colocarán todos los terminales de control. Los costos de fabricación son más elevados y necesitan un mantenimiento anual. La vida de los manómetros se considera de 10 años aproximadamente, por lo que deberán ser reemplazados cada este tiempo. ¹⁵

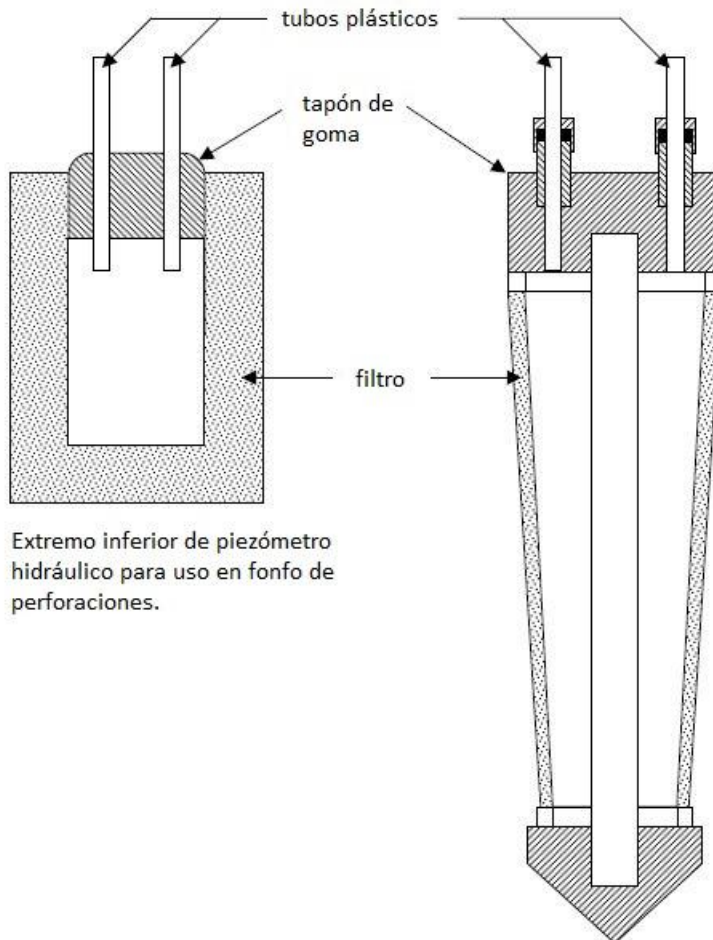


Figura 2.8: Piezómetro hidráulico.
Fuente: Reglamento CIRSOC – 401 ¹⁶

2.2.1.3 Piezómetros Neumáticos:

Estos piezómetros se usan para medir la presión de poros que se presenta en las masas del suelo; consiste en una punta porosa conectada a una cámara de equilibrio que contiene una válvula o diafragma sensitivo que abre o cierra la conexión entre los dos tubos que alcanzan la superficie donde se realiza las mediciones. Este diafragma es accionado por fluidos que pueden ser gas, agua u otros. Para el funcionamiento es necesario transmitir una presión a la cámara de equilibrio, provocando que el diafragma se separe y comunique los dos conductos de forma regular. Se puede decir que la presión se ha igualado en la cámara, por lo tanto la presión de poro es la que se representa en el manómetro. ¹⁵

Sus principales ventajas son primero que es muy simple en su uso, no depende de electricidad, son sensibles y prácticamente no necesitan mantenimiento. Como desventajas esta que sus datos deben ser tratados cuidadosamente para que tengan validez, en suelos de alta plasticidad puede dar lecturas erradas y el nivel de precisión no es bueno cuando las presiones son bajas. ¹⁷

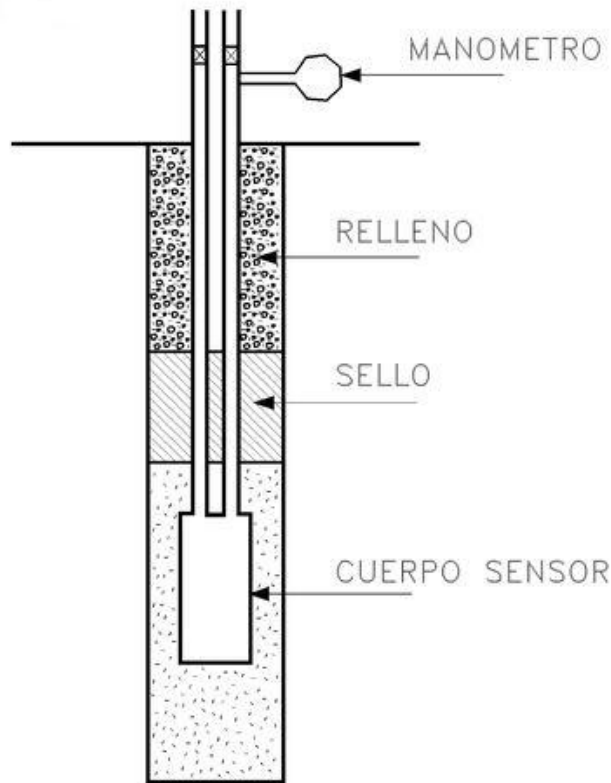


Figura 2.9: Piezómetro neumático.
Fuente: Procedimientos de Investigación ¹⁸



2.2.1.4 Piezómetros Eléctricos:

Estos piezómetros al igual que los anteriores usa una piedra porosa por donde penetra el agua intersticial deformando una membrana sensible de manera proporcional a la presión del agua aplicada, la cual es medida por medio de varios sensores o transductores eléctricos. La presión de agua se convierte en una señal eléctrica por los sensores, y esta es transmitida por medio de cables al sitio de medición.

Una de las principales ventajas de este tipo de piezómetros es que su respuesta es casi inmediata por ser muy sensibles. Como desventajas se tiene que necesitan precauciones extras, técnicas de instalación y medición, problemas con el aislamiento y no se los considera como un aparato de largo plazo.^{15 12}

Existen varias tecnologías en la fabricación de piezómetros eléctricos con diferentes sensores. Los principales son:

- **Piezorresistivos:** Tiene una respuesta muy rápida y tiene una gran precisión en rangos pequeños. Se recomienda usar con objetivos de medición a corto plazo. Presenta problemas con la señal eléctrica conforme el cable se vaya alargando.
- **Fibra óptica:** Estos sensores miden la presión del agua a una membrana sin contacto directo y registran las deformaciones de un MOM's (Elemento mecánico óptico en miniatura). Inmune a interferencias de radio, eléctricas y magnéticas. Sus sensores son pequeños, por lo que se pueden instalar en tuberías delgadas. Es muy estable y no se afecta por cambios térmicos. Los costos son altos que de otros sensores y se necesita de técnicos especializados.
- **De cuerda vibrante:** Estos piezómetros están formados por un diafragma, una cuerda de acero tensionado y una bobina electromagnética. Cuando se producen cambios de la presión en el diafragma, la tensión en la cuerda de acero cambia igualmente. La bobina produce un pulso de voltaje provocando que la cuerda vibre. Esta frecuencia de vibración varía según la tensión de la cuerda y es idéntica a la frecuencia de voltaje de salida que se transmite hasta un dispositivo de medición a través de un cable. De esta manera se puede medir la variación de presión de poros.^{12 - 15}

Las ventajas presentes son que su uso ya es generalizado y los resultados presentan total garantía. Fáciles de usar, incluye instalación y lectura. Funcionan en suelos de baja permeabilidad y donde existen presiones de poro negativas.

Su inconveniente es ser más caros que otros sistemas, pero por los resultados se contrarresta este problema.¹⁵

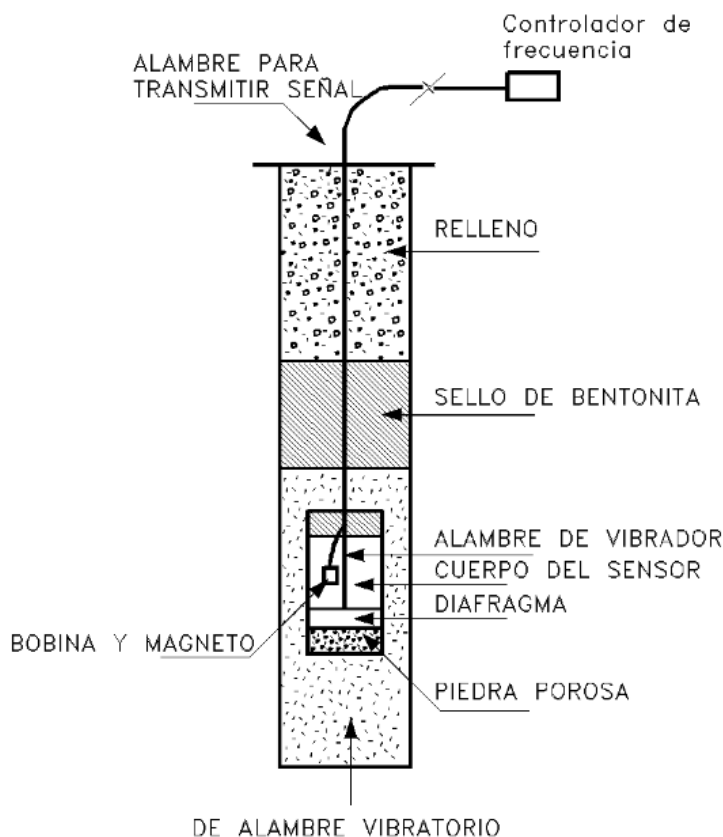


Figura 2.10: Piezómetro de cuerda vibrante.
Fuente: Procedimientos de Investigación ¹⁸

En general todos estos sistemas eléctricos pueden ser automatizados y controlados de una manera remota, facilitando la obtención de datos en un solo banco computarizado de información.

2.3 MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES:

Por lo general en represas, diques y estructuras de control de aguas se encuentran sujetas a cargas externas que causan deformaciones y filtraciones tanto en su cimentación como en su estructura.

Lo recomendable es realizar mediciones e inspecciones visuales mediante la colocación de dispositivos de auscultación, lo cual se pretende controlar aquellos parámetros más importantes del comportamiento de la presa y el cimiento, para así comprobar su funcionamiento o por lo contrario, detectar la aparición de anomalías que puedan comprometer la seguridad de la obra. Los parámetros que mejor reflejan dicho



comportamiento son: movimientos, deformaciones, presiones de agua, filtraciones y deterioro de los materiales constituyentes de la presa.

Para calcular los movimientos superficiales que se producen durante la construcción y explotación de una presa se deben instalar 2 tipos de monumentos (testigos, hitos) que servirán para realizar las mediciones. Estos testigos que son estaciones de control son: testigos superficiales y bancos de referencia.

En obras hidráulicas como la presa Lechugal 2, se debe controlar los movimientos superficiales, este monitoreo debe estar equipado con instrumentos apropiados y puntos fijos de acuerdo a las características de las observaciones, tipo y tamaño de la estructura y condiciones del sitio.

El mismo peso del dique y la presión hidrostática de agua del reservorio provocan que el material de relleno presente un asentamiento, dando como resultado una deflexión vertical de la estructura. La presión del agua del reservorio también causa una deformación horizontal que es perpendicular al eje del dique.

Dependiendo del tipo y condición de la estructura, los sistemas de monitoreo deben cumplir con la condición de medir tanto movimientos de larga duración como deformaciones de corta duración. Las medidas de larga duración son mucho más comunes y más complejas dada su naturaleza externa. Un monitoreo que se realice en un largo período de tiempo para un movimiento de una estructura, requiere de observaciones desde puntos de una red de referencia externa hasta puntos emplazados sobre la misma estructura. Estos puntos de la red de referencia externa se deben instalar sobre un terreno estable, además de ser intervisibles entre ellos. Esta red también debe ser monitoreada con intervalos de tiempo menos frecuentes para asegurar que dichos puntos no hayan sufrido desplazamiento. Las técnicas e instrumentos empleados son las tradicionales en topografía, que permitan establecer y monitorear los puntos de la red de referencia.¹⁹

2.3.1 Tipos de monumentos:

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de herramientas para la medición y cálculo de manera rápida, eficaz y precisa de los movimientos superficiales. El método más sencillo, económico y confiable es la instrumentación superficial que consiste en utilizar los datos topográficos medidos desde hitos, para conocer los movimientos que se manifiestan en la superficie de la obra.

Para obtener los movimientos que se producen en la cortina y en el terraplén de la presa Lechugal 2, durante y posteriormente a su construcción es necesario instalar un

grupo de monumentos que están divididos en dos grupos que son: Los testigos superficiales y los bancos de referencia.

2.3.1.1 Testigos Superficiales:

Son referencias topográficas instaladas a lo largo de la corona y secciones transversales de la cortina, a través de los cuales se miden asentamientos o variaciones entre las distancias originales al momento de su instalación.

Según el Manual de Instrumentación del CONAGUA de México DF ¹² hay dos tipos de testigos superficiales: el testigo superficial para medir los movimientos horizontales (TSMH) y el testigo superficial para medir los movimientos verticales (TSMV).



Figura 2.11: Testigo superficial.
Fuente: Geodata Andina. ²⁰

2.3.1.2 Bancos de referencia:

Son monumentos ubicados en puntos estratégicos en laderas estables y firmes, fuera de la influencia de la construcción de la presa. Con dichos bancos de referencia se puede conocer las cotas de altura con respecto al nivel del mar y realizar mediciones hacia los testigos superficiales. Se tienen dos tipos de bancos de referencia: Los de control horizontal (BRCH) y los bancos de referencia para control vertical, llamados también bancos de nivel (BN).

A partir de los bancos de referencia para el control horizontal (BRCH) se realizan las mediciones hacia los testigos superficiales para los movimientos horizontales (TSMH) para conocer los movimientos horizontales, y desde los bancos de nivel (BN) se realizan las mediciones a los testigos superficiales para medir los movimientos verticales (TSMV) para ver los movimientos verticales.¹²



Figura 2.12: Banco de referencia.

Fuente: Colocación de bancos de nivel S.E. Chihuahua.²¹

2.3.2 Localización de Monumentos:

El procedimiento para el monitoreo de deformación de estructuras y cimentación, está relacionada con las mediciones espaciales de desplazamiento de objetos topográficos a monitorear desde puntos de una red externa, los cuales tienen una posición fija y definida.

Los puntos principales para el control de una presa son los bancos de referencia, tanto horizontales (BRCH) como verticales (BN). Los que corresponden a la red primaria.

Para la ubicación de los monumentos se parte del trabajo preliminar de planos topográficos que fueron realizados para los estudios de Factibilidad del PACALORI, que cubre toda la zona de interés. Con estos datos se observa todos los accidentes del



terreno y elegir los sitios altos para la ubicación de los BRCH y de los BN, buscando tener una buena visibilidad entre ellos y que estén fuera de la influencia de la construcción.

Los puntos se los puede colocar con un navegador (GPS) que nos da en coordenadas UTM, el equipo tiene un margen de error importante (± 3 m a 5 m), dependiendo del instrumento, presencia de nubosidad y la cobertura de vegetación en los lugares donde se va a ubicar los puntos, pero esto se acepta para el levantamiento preliminar.

Con base al levantamiento preliminar, se hace el replanteamiento de los vértices en campo. Este trabajo se lo va a realizar con estación total lo cual consiste en ubicar los sitios de localización de los BRCH y BN.

Los testigos superficiales para el control de movimientos horizontales (TSMH) Estos se encuentran distribuidos longitudinalmente a lo largo de la corona y la berma de la presa ya que por la altura de esta no es necesarias más líneas de testigos.

En cambio los testigos superficiales para el control de movimientos verticales se los localiza en la corona y en la berma de la presa, estos tienen la función de medir los asentamientos o expansiones de la cortina.

El número de monumentos a utilizar en el control de una presa, dependerá de las necesidades del proyecto de instrumentación, y tendrá que correlacionarse entre la magnitud de la obra y la economía del proyecto.

2.3.3 Construcción de monumentos:

2.3.3.1 Testigos superficiales para el control de movimiento horizontal (TSMH)

Estos testigos se construyen de concreto simple con una resistencia $f'c = 140$ kg/cm² con las dimensiones mostradas en la Figura 2.13; su profundidad de desplante podrá ser entre 40 cm y 60 cm. En la parte superior y central del testigo se encuentra un perno llamado “perno de centraje forzoso”. Además se utiliza un tornillo de acero con cabeza de gota de 5/8 pulg de diámetro y longitud 10.16 cm, esto sirve como base al estadal para la nivelación. Se debe colocar un tapón de protección que tendrá una llave de seguridad para poderla abrir, y por encima una tapa de placa galvanizada con un porta candado.

Con el fin de garantizar la verticalidad del perno de centraje forzoso, durante la instalación del testigo se utiliza un dispositivo que consiste en una base nivelante, similar a la de un nivel o un teodolito, la cual va montada sobre una placa que se

acopla al perno y que une al sistema nivelante (Ver Figura 2.14). Previo al fraguado del concreto, se coloca el dispositivo con el perno, se nivela y se deja fraguar antes de retirar el mecanismo.

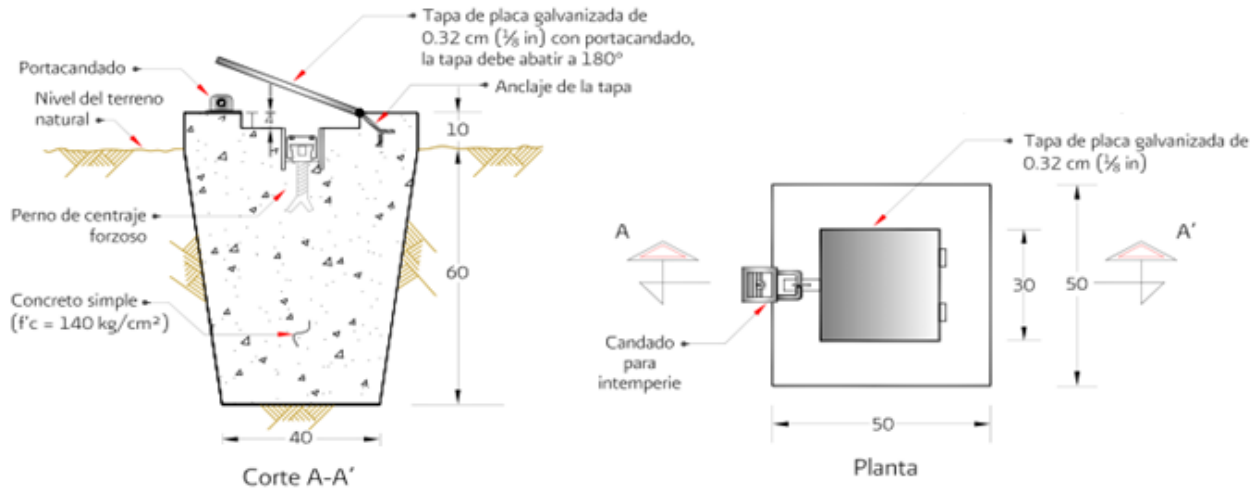


Figura 2.13: Dimensiones (TSMH)

Elaboración: Manual de Mecánica de suelos CONAGUA.¹²

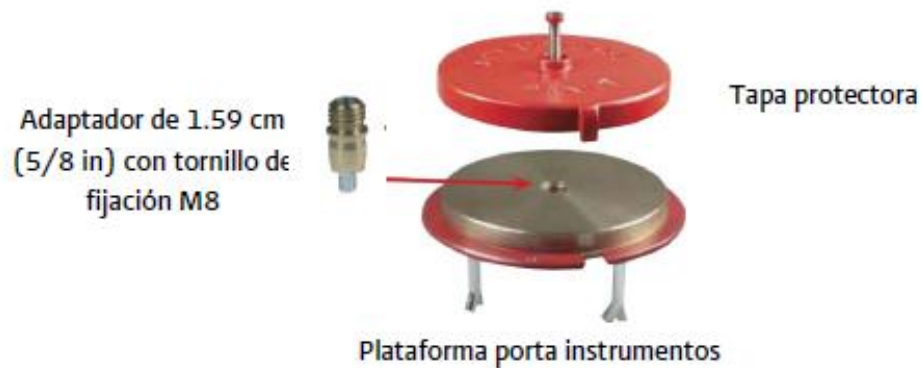


Figura 2.14: Perno de centrado forzoso y plataforma porta instrumento con tapa.

Elaboración: Catálogo GeoConcept.²²

2.3.3.2 Testigos superficiales para el control de movimientos verticales (TSMV)

Este testigo se construye de concreto simple con una resistencia $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$, tiene forma de pirámide truncada, con dimensiones de 50 cm x 50 cm en su base superior, de 40 cm x 40 cm la base inferior y de 70 cm de altura. En su parte central aloja una barra de acero de 1.9cm (3/4pulg) de diámetro y entre 30 cm y 35 cm de

longitud, la barra sobresale unos 2 cm o 3 cm. De igual manera se recomienda colocar una tapa de placa galvanizada para su protección. (Ver Figura 2.15)

Los TSMV localizados sobre la corona se deben desplantar sobre el material impermeable. Se debe remover el revestimiento de la corona y profundizar la excavación cuando menos 60 cm en el material impermeable. Se debe proteger de inmediato con alguna lechada de 5 cm de espesor de concreto pobre. La excavación se rellena posteriormente con concreto con agregado no mayor de 10.2 cm (4 pulg) de diámetro, al centro del TSMV se inserta una varilla de acero con terminación en punta de bala. Los TSMV también pueden ser ubicados sobre el talud (Ver Figura 2.16), lo cual evita excavar los materiales del talud, previniendo inestabilidades.

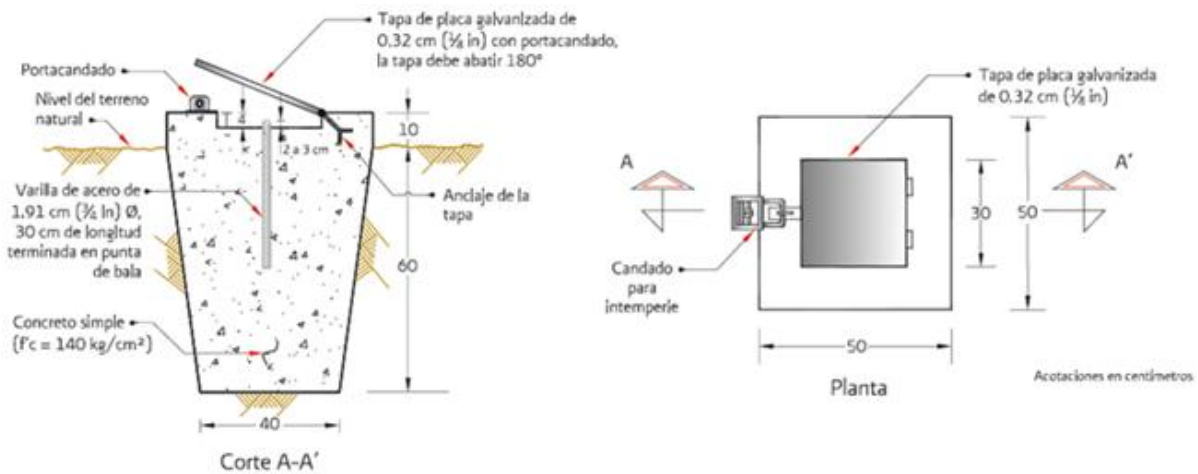


Figura 2.15: Dimensiones de los TSMV.
Elaboración: Manual de Mecánica de suelos CONAGUA.

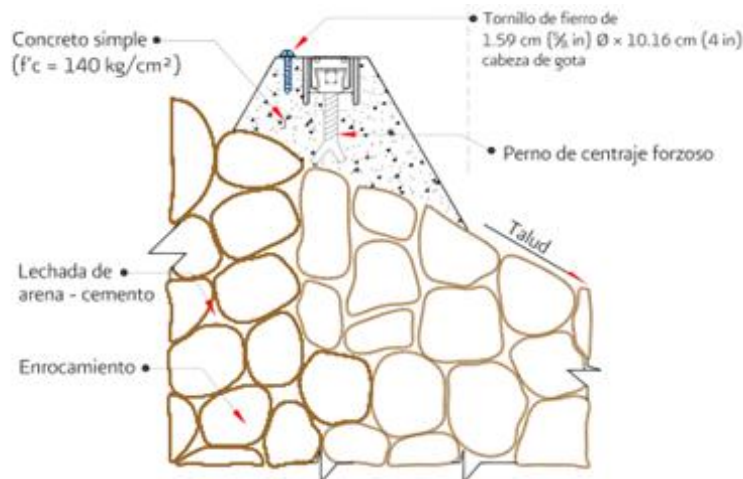


Figura 2.16: TSMV sobre el enrocado del talud.
Elaboración: Manual de Mecánica de suelos CONAGUA.

2.3.3.3 Banco de referencia para control horizontal (BRCH)

También conocido como “monumento de centraje forzoso”. Es una columna de 1.3 m de altura sobre el nivel del terreno natural con el fin de colocar la estación total sobre él, quedando el ocular a la altura de los ojos del operador. En la Figura 2.17 se muestran un ejemplo de BRCH.

También se puede construir una columna cuadrada de 40 cm x 40 cm con aristas achaflanadas, la base es una zapata cuadrada de 1.2 m x 1.2 m. Dependiendo de las características del terreno, se profundizará de 40 cm a 50 cm. En la parte superior de la columna del monumento se debe poner una placa para fijar la estación total la cual se utiliza para realizar las medidas.



Figura 2.17: Monumento de centraje forzoso.
Elaboración: TOPOCAD.²³

2.3.3.4 Banco de nivel (Banco de referencia para control vertical, BN)

Este monumento se divide en 2 tipos que son:

1- Banco de nivel de la Red Primaria

Este monumento se enlaza con la Red Geodésica Vertical, se encuentran alejados fuera de la influencia de la presa. En la Figura 2.18 se muestra los detalles del monumento que está construido por concreto armado con una varilla de 1.91cm (3/4pulg) de diámetro y 30cm de longitud, en el centro de este se colocará una

varilla con punta de bala que estará sobresalida entre 2cm y 3cm con el nivel del concreto. Cada monumento deberá tener sus coordenadas correspondientes (X,Y,Z).



Figura 2.18: Banco de nivel de red primaria.
Elaboración: PRODUNAS. ²⁴

2- Banco de nivel de la Red Secundaria:

Este monumento se enlaza a la Red Primaria, es menos robusto, con forma de pirámide truncada de dimensiones de 50 cm x 50 cm en su base mayor, 40 cm x 40 cm en su base menor y 70 cm de altura, similar al testigo superficial que se muestra en la Figura 2.19. Se construye de concreto simple con un $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$, en la parte central se aloja una varilla corrugada de 1.91 cm (3/4 pulg) de diámetro y de 30 cm de longitud. La varilla debe quedar sobresalida del nivel del concreto de 2 cm a 3 cm y terminar en punta de bala. De acuerdo con las condiciones del sitio, se deberá excavar hasta 60 cm de profundidad o menos donde se encuentre roca sana.



Figura 2.19: BN de la Red secundaria.
Elaboración: Instituto Nacional de Estadística y Geografía – INEGI. ²⁵



2.3.4 Métodos topográficos para obtener los desplazamientos:

2.3.4.1 Método topográfico para obtener los desplazamientos horizontales:

El método que utilizaremos para el cálculo de los movimientos horizontales en la presa Lechugal 2 es el de poligonación, también llamado itinerario que es una sucesión encadenada de radiaciones, donde se debe obtener como resultado final las coordenadas (X, Y, Z) de los puntos de estación. Se parte de un punto de coordenadas conocidas y se llega a otro también de coordenadas conocidas. Desde el punto inicial y final se visará a una referencia, también de coordenadas conocidas, como mínimo.

Las estaciones de la poligonal tendrán que:

- Tener intervisibilidad entre ellas.
- Estar relacionadas entre sí (acimutes y distancias).
- Poder desempeñar el trabajo para el que se ha diseñado la poligonal, desde los puntos de estación.

En el caso de Lechugal 2 el polígono es cerrado ya que las coordenadas iniciales y finales serán las mismas.

El equipo principal a utilizar es la *Estación Total* que es un instrumento topográfico que consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico. Con ella se puede realizar las mediciones electrónicas de distancias, transferir los datos a un procesador interno o externo.

Además vienen provistas de diversos programas sencillos que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo, replanteo de puntos de manera sencilla y eficaz y cálculo de acimutes y distancias.

Para obtener datos correctos y de calidad debemos tener en cuenta 2 aspectos:

Mantenimiento: Para un funcionamiento adecuado de los equipos de medición se debe dar un mantenimiento diario, ya que con el uso y el tiempo estos pueden tener deterioros. Para asegurar que el sistema de medición permanezca en óptimas condiciones se debe dar el mantenimiento previo, evitando con anticipación que ocurra un daño. Los requisitos y formas de mantenimiento se basan en los manuales de instrucciones de los fabricantes del equipo.

La falta de mantenimiento regular y sistemático puede invalidar los datos obtenidos y llegar a conclusiones erróneas. Cada instrumento de monitoreo debe llevar una bitácora de servicio en la que se anoten las operaciones de mantenimiento, verificación, reparación y reemplazo de componentes.

Verificación: Es la comprobación de un funcionamiento óptimo del equipo, por esto es una actividad cotidiana que se va a realizar antes de tomar lecturas. En la obra utilizaremos monumentos que están sujetos a una línea base para la verificación del equipo en función de la medición de distancias y ángulos.

Para una buena verificación se deben efectuar operaciones en los equipos de medición que son:

- Verificación de los ejes vertical y horizontal.
- Certificado de calibración.
- Comprobación y ajuste de la plomada óptica o láser.
- Comprobación y ajuste del distanciómetro infrarrojo o láser.
- Ajuste de los niveles circulares y tóricos.
- Engrase de elementos mecánicos.
- Limpieza general del instrumento y maleta



Figura 2.20: Estación Total.

Elaboración: Monitoreo y Control Topográfico de Obras.¹⁹

2.3.4.1.1 Toma de Lecturas:

Para la toma de lecturas se utiliza el banco de referencia para control horizontal (BRCH), los testigos superficiales para movimientos horizontales (TSMH), prismas y adaptadores de centraje forzoso.

El prisma utilizado para las mediciones se monta con un adaptador al tornillo de centraje forzoso de los testigos superficiales. Con la ayuda de la estación total, se mide y se obtiene las coordenadas (X, Y, Z) de los monumentos de referencia para el control



horizontal, ya que estas coordenadas servirán como base para la medición de los movimientos horizontales de la presa Lechugal 2. También se puede utilizar el equipo GPS geodésico pero se debe ver la precisión del instrumento para minimizar el error.

Para la toma de lecturas de los TSMH se coloca la estación total en el BRCH, se centra y se nivela, luego se hace puntería sobre el monumento que sirve de mira de referencia que se encuentra en la otra ladera, haciendo coincidir el hilo vertical del lente con el prisma ubicado en el monumento de referencia, fijado el movimiento horizontal del limbo de la estación total.

Desde ese monumento y hasta terminar las observaciones, se van tomando las lecturas correspondientes para cada testigo (TSMH). Se va colocando el prisma reflector en el perno de centraje forzoso y se realiza varias lecturas de cada uno para trabajar con los promedios correspondientes.

Los datos obtenidos son ángulos y distancias, ya sea inclinadas o distancias horizontales, o también pueden ser coordenadas (X, Y, Z) correspondientes a cada testigo superficial.¹²

2.3.4.1.2 Cálculo:

Para conocer la dirección y magnitud de los desplazamientos horizontales en la corona y en los taludes de la presa Lechugal 2 se realizan cálculos para obtener las coordenadas correspondientes a cada uno de los testigos superficiales, así como los rumbos de las visuales a cada testigo y el desplazamiento respectivo, todo esto referido a la línea base utilizada. Es importante señalar que se trabaja con promedios de las lecturas, así se trate de coordenadas (X, Y, Z).

Con las coordenadas obtenidas de las observaciones realizadas, se obtiene el valor promedio de las coordenadas que se registran en el formato que se muestra en el Anexo 5.

El desplazamiento observado se calcula con la ecuación:

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Donde:

- D = Distancia entre dos puntos
- X_1 = Valor de la coordenada X del punto 1
- Y_1 = Valor de la coordenada Y del punto 1
- X_2 = Valor de la coordenada X del punto 2
- Y_2 = Valor de la coordenada Y del punto 2

Si se obtuvieron distancias en lugar de coordenadas, éstas deben ser las distancias horizontales, caso contrario se debe calcular utilizando las distancias inclinadas y los ángulos verticales; utilizando las funciones trigonométricas.

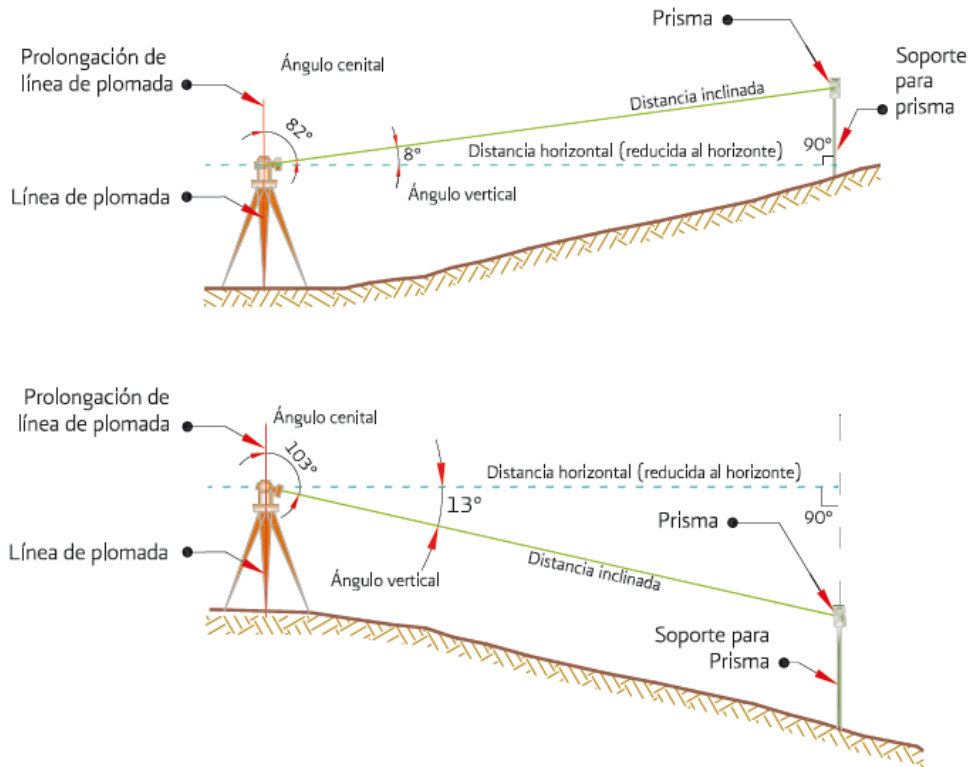


Figura 2.21: Cálculo de distancias horizontales.
Elaboración: Manual de Mecánica de suelos – CONAGUA. ¹²

A partir de las distancias horizontales se calculan los ángulos de los triángulos oblicuángulos formados por la línea base y el testigo observado, para esto se utilizan las formulas trigonométricas según las incógnitas que se presenten.

En la obra se obtiene el rumbo o azimut de la línea base y de cada una de las visuales que se observa para después calcular las coordenadas de los testigos observados.

El **rumbo** de una línea es la orientación de a la línea norte-sur, el valor es angular y esta medido desde la línea de referencia (norte-sur), hasta dicha línea. El rumbo puede ser NE, NW, SE, SW, el máximo valor angular del rumbo es de 90° .

El **azimut** es el ángulo medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir del meridiano de referencia (norte-sur), está comprendido entre y 360° .

2.3.4.2 Método topográfico para obtener los desplazamientos verticales:

Para la obtención de los desplazamientos verticales en la presa Lechugal 2 se deberá usar la nivelación geométrica o diferencial, este método es el más preciso y utilizado de todos, se lleva a cabo mediante la utilización de nivel óptico o electrónico, en este método no es necesario la corrección por curvatura de tierra, ya que la distancia entre testigos es pequeña. Se va a obtener la diferencia de niveles entre dos puntos a partir de las visuales horizontales lanzadas a las miras de los puntos de interés.

Según la topografía del terreno y la ubicación de los testigos se realizará la nivelación simple que es la obtención del desnivel entre dos puntos de interés con una sola visual, caso contrario se realizara la nivelación compuesta que es necesario la puesta de una estación intermedia entre los puntos.

El equipo que se tiene que utilizar en esta ocasión es el nivel topográfico, también llamado nivel óptico o equialtímetro es un instrumento que tiene como finalidad la medición de desniveles entre puntos que se hallan a distintas alturas o el traslado de cotas de un punto conocido a otro desconocido.¹⁹

Pueden ser manuales o automáticos, según se deba horizontalizar el nivel principal en cada lectura, o esto se haga automáticamente al poner el instrumento "en estación". El nivel óptico consta de un anteojo similar al del teodolito con un retículo estadimétrico, para apuntar y un nivel de burbuja muy sensible, que permita mantener la horizontalidad del eje óptico del anteojo, ambos están unidos de manera que cuando el nivel está desnivelado, el eje del anteojo no mantiene una perfecta horizontalidad, pero al nivelar el nivel también se horizontaliza el eje óptico. La precisión de un nivel depende del tipo de nivelación para el que se lo utilice. Lo normal es un nivel de entre 20 y 25 aumentos y miras centimetradas o de doble milímetro. Con este nivel se pueden hacer nivelaciones con un error de aproximadamente 1.5 cm por kilómetro de nivelada.¹⁹



Figura 2.22: Nivel topográfico para mediciones verticales.
Elaboración: GeoConcept.²²



De igual manera para obtener datos correctos y de calidad se debe tener en cuenta 2 aspectos:

Mantenimiento: Como todos los instrumentos de medición, para un correcto funcionamiento y control de lecturas se debe dar un mantenimiento diario. Los requisitos y formas de mantenimiento se basan en los manuales de instrucciones de los fabricantes del equipo.

La falta de mantenimiento regular y sistemático puede invalidar los datos obtenidos y llegar a conclusiones erróneas.

Verificación: Es la comprobación de un funcionamiento óptimo del equipo, por lo que se debe hacer diariamente antes de cualquier medición.

Se listan las operaciones que se deben realizar a los niveles para una buena verificación:

- Verificación del eje horizontal y ajuste de piezas
- Limpieza general del instrumento y de la maleta de transporte
- Ajustes del nivel circular
- Verificación del compensador

2.3.4.2.1 Toma de Lecturas:

Para la determinación de los movimientos verticales que se van a producir en la presa Lechugal 2 es necesario tener puntos de referencia, los cuales van a ser los banco de nivel (BN) de la red primaria enlazado a un banco de nivel de red Geodésica Nacional con nivelación de precisión. Son 4 los bancos que colocamos en laderas firmes alejadas de la influencia de la obra para tener un control de los movimientos, para obtener las coordenadas (X, Y) de los BN se puede utilizar un equipo de GPS.

Los bancos de nivel de la Red Secundaria se localizan en los sitios convenientes para nivelar a partir de éstos los TSMV. Los testigos superficiales para movimiento vertical (TSMV) están ubicados en la corona y en la berma de la presa, como se muestra en el Plano de Hitos. Una vez nivelados los bancos de nivel de la Red Secundaria, se nivelan a partir de ellos los TSMV para conocer las elevaciones de cada uno, se recomienda realizar tres nivelaciones de ida y vuelta para un mejor control y asignar la elevación promedio a cada TSMV.



2.3.4.2.2 Cálculo:

Luego de obtener las lecturas y ser presentadas en el formato de una tabla, se realiza el cálculo de la magnitud de los movimientos verticales con la siguiente operación:

$$\text{Desplazamiento vertical} = \text{Elevación actual} - \text{Elevación inicial}$$

Si la deformación resulta con el signo positivo (+), los movimientos observados corresponden a una expansión, y si el valor es negativo (-) corresponde a un asentamiento.

Para la presentación de los resultados se realiza una gráfica con la separación entre testigos en el eje horizontal y los movimientos verticales en el eje vertical.

Otra manera de representar los resultados de los movimientos sería una gráfica con los movimientos verticales de los testigos de la presa en el eje vertical, con el tiempo en el eje horizontal.

Se recomienda presentar la gráfica en papel semilogarítmico, con los asentamientos a escala natural y el tiempo a escala logarítmica.



CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el capítulo de Resultados se presenta los instrumentos a utilizar en el control de la Presa de Lechugal 2, tanto para la presión de poros, como para los movimientos superficiales. También se muestra el número de piezómetros e hitos en el diseño del proyecto de instrumentación, así como su ubicación.

3.1. DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA LA PRESA LECHUGAL 2

La necesidad de instalar un instrumento debe responder las preguntas de qué se necesita medir, por qué, cómo y dónde. Todas estas respuestas se fundamentarán en la predicción de los resultados y así se podrá escoger el tipo y número de instrumentos.

3.1.1 Piezómetros a utilizar en la presa Lechugal 2:

Como ya conocemos la presa se divide en 2 partes. El cuerpo y su cimentación. Estas tendrán características diferentes de materiales y permeabilidad principalmente, por lo que es necesario analizarlas de forma separada. Esto quiere decir que por sus características se puede usar diferentes tipos de piezómetros, según el tipo de respuesta que buscamos en la adquisición y toma de datos.

En el cuerpo y el cimiento de la presa, los piezómetros sirven para comprobar las hipótesis de diseño de los proyectistas y verificar el correcto funcionamiento de la presa.

Por lo tanto, se pueden utilizar piezómetros abiertos de tipo Casagrande en todo el cuerpo de la presa, por su fácil instalación y toma de datos, y enfocado en la economía del proyecto, ya que serían instrumentos más económicos y de fácil mantenimiento. La respuesta de los cambios de la presión interna no es rápida con este tipo de piezómetros, por lo que es necesario esperar que el material se encuentre totalmente saturado para poder tomar las lecturas.

En general los piezómetros de tipo Casagrande se utilizan para detectar, medir y monitorear el nivel freático, e indirectamente, la presión de poro en el suelo, específicamente a la profundidad de instalación de la punta de medición, por lo que es



necesario en el diseño del proyecto de la presa conocer los puntos críticos de medición y obtener datos de utilidad. Estos puntos ya se indicaron en el literal 2.5.1.

El instrumento básicamente estará compuesto por: tramos de tubo PVC con diámetro especificado según el diseño, que serán empalmados mediante accesorios de unión y las mismas se fijarán con pegamento especial para tubería PVC. La cantidad de tramos a usar estará determinada por la longitud de la perforación realizada para la instalación, punta de plástico poroso tipo Casagrande y sonda indicadora de nivel (diferentes modelos).

La cimentación de la presa en cambio estará regido por la estratigrafía natural de la zona. Como se lo analizó anteriormente, los puntos más críticos son los lentes de arena que pueden existir a diferentes profundidades. Como ya se recomendó anteriormente, el constructor y el instalador deberán realizar sondeos complementarios para ubicar la profundidad y potencia de estos lentes, además del sentido que siguen con respecto a la presa. Por estas zonas será donde la infiltración se producirá de una forma mayor con respecto al suelo, ya que en los análisis previos se realizó un promedio de infiltración de todos los estratos con el método Lefranc, por lo que el resultado es un promedio de todos los materiales obtenidos en el sondeo. Donde se considerada la zona más crítica se plantea la colocación de piezómetros eléctricos tipo cuerda vibrante, para así obtener datos rápidos casi instantáneos cuando entren en funcionamiento este tipo de piezómetros, y generar un control desde el primer momento.

Por lo tanto, en primera instancia y pensando en la economía del proyecto se ve la necesidad de colocar piezómetros de Casagrande ya que son los menos costosos, (Ver Anexos 1, 2 y 3) además, si estos son colocados posterior a la construcción de la presa se evita una problemática extra al constructor durante la etapa constructiva de la misma por las complicaciones que acarrea cuidar los tubos piezométricos en varios frentes de trabajo. En segunda instancia los piezómetros de Casagrande solo servirán para medir la presión de poros cuando el material de la cimentación y del cuerpo se encuentren saturados y así ubicar y comparar la LCS real con la proyectada en los diseños definitivos. Se evita usar, de esta forma otro tipo de piezómetros como los eléctricos de cuerda vibrante por su alto costo y porque el aprovechamiento de sus funciones estarían desaprovechadas, si solo se los va a instalar luego de la construcción de la presa como se tiene previsto, ya que estos piezómetros pueden medir desde presiones negativas y en condiciones húmedas o semisaturada como las que se presentan durante la etapa constructiva de la presa. En esta etapa se buscaría medir la presión de poro cuando se necesite conocer la velocidad de construcción, porque se está utilizando un material muy impermeable donde se generan presiones altas que pueden poner en peligro los taludes de la presa. En ese caso se deberán instalar drenajes





horizontales que ayuden a disipar esas presiones. Pero en el proyecto PACALORI, las presas estarán construidas por un material no muy impermeable, por lo que no se tiene la necesidad de colocar drenajes horizontales, pero si cuidar la estabilidad del talud de aguas abajo principalmente. Por estas condiciones se justifica el uso del piezómetro de Casagrande.

Con estos antecedentes se prevé colocar un mínimo de 24 piezómetros en el talud aguas abajo en las 3 secciones críticas pre establecidos en la Figura 2.3 del capítulo de Materiales y Métodos. Estos piezómetros tienen la función de medir la presión hidrostática de los sectores considerados críticos en la presa, para conocer como se está comportando en la etapa de explotación.

La construcción de una presa altera el entorno del lugar de emplazamiento y en este caso influye en la manera de infiltración del agua a través de las laderas naturales que forman parte de los estribos del cuerpo de la presa. Como el nivel de agua sube con el embalse, este empezará a saturar zonas altas que nunca se encontraron sumergidas. Por ello aguas abajo será necesario controlar el nivel freático en las laderas para conocer como se está comportando el lugar y verificar que no existirán problemas de deslizamiento. Para este control se colocarán 2 piezómetros en las laderas izquierda y derecha. Además un piezómetro extra muy cerca de la estación de bombeo, que estará ubicada aguas abajo de la presa y por lo tanto es un buen lugar para tomar medidas y estar prevenidos en caso de problemas de subpresión en un sitio tan importante del proyecto.

La ubicación de los piezómetros en el cuerpo de la presa se presentan en la Tablas 3.1 - 3.2 - 3.3, y los piezómetros de las laderas y de la estación de bombeo en la Tabla 3.4. Además podrán ser observados en los Planos general, planta – corte y P A3-A4-A6.

UBICACIÓN DE LOS PIEZOMETROS EN LA PRESA DE LECHUGAL 2						
UBICACIÓN	SÍMBOLO	EJE	NOMBRE	COORDENADAS WGS 84		COTA (msnm)
				X	Y	
CORTE A3 0+200		CL	P1	674057.51	9851063.89	34
			P2			28
			P3			22
			P4			16.5
		E1	P5	674081.33	9851044.30	29
			P6			26
			P7			VARIABLE



CORTE A3 0+200		E2	P8	674101.41	9851027.79	22
-------------------	--	----	----	-----------	------------	----

Tabla 3.1: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A3 - 0+200

UBICACIÓN DE LOS PIEZOMETROS EN LA PRESA DE LECHUGAL 2						
UBICACIÓN	SÍMBOLO	EJE	NOMBRE	COORDENADAS WGS 84		COTA (msnm)
				X	Y	
CORTE A4 0+300		CL	P9	674057.51	9851063.89	33
			P10			28
			P11			21
			P12			14
		E1	P13	674017.81	9850967.07	28
			P14			24
			P15			VARIABLE
	E2	P16	674041.76	9850947.38	20	

Tabla 3.2: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A4 - 0+300

UBICACIÓN DE LOS PIEZOMETROS EN LA PRESA DE LECHUGAL 2						
UBICACIÓN	SÍMBOLO	EJE	NOMBRE	COORDENADAS WGS 84		COTA (msnm)
				X	Y	
CORTE A6 0+400		CL	P17	674057.51	9851063.89	33
			P18			28
			P19			22
			P20			14.5
		E1	P21	673954.28	9850889.84	28
			P22			24
			P23			VARIABLE
	E2	P24	673978.26	9850870.12	20	

Tabla 3.3: Ubicación de piezómetros en la presa Lechugal 2 – Corte A6 - 0+400




UBICACIÓN DE LOS PIEZOMETROS EN LA PRESA DE LECHUGAL 2						
UBICACIÓN	SÍMBOLO	EJE	NOMBRE	COORDENADAS WGS 84		COTA (msnm)
				X	Y	
Laderas y Estación de Bombeo		-	P25	673905.06	9850804.83	37
			P26	673971.07	9850783.31	26
			P27	674146.82	9851015.29	23.5
			P28	674212.93	9851140.16	27
			P29	674082.12	9850915.87	23.5

Tabla 3.4: Ubicación de piezómetros en Laderas y Estación de Bombeo.

3.1.2 Instalación piezómetro de Casagrande:

Los procedimientos para la instalación de los piezómetros abiertos están en función de las condiciones de los materiales que se atraviesan y las que establecen el proyecto.

Para instalar un piezómetro es necesario localizar topográficamente la posición del brocal del tubo, así como su elevación con respecto a un banco de nivel.

El equipo utilizado para perforar debe garantizar la verticalidad durante el proceso, con los diámetros especificados en el proyecto. Cuando la perforación provoque caídas durante las operaciones de instalación, se deberá usar ademe metálico recuperable; se debe evitar utilizar lodos de bentonita como estabilizadores de las paredes de la perforación.

La perforación debe llegar hasta una profundidad de 50 cm por debajo de la profundidad de localización del centro de la punta porosa, según lo indique el proyecto. Previo al descenso del bulbo, se vierte arena gruesa a media, limpia, bien graduada, en un espesor de 30 cm sobre el fondo de la perforación; en tanto, el piezómetro se envuelve en arena gruesa a fina, sostenida por una malla de geotextil filtrante. Para el descenso se acoplan los tramos de tubería de PVC, cuidando su limpieza interna. En el caso de la presencia de ademe, éste se extrae desde el fondo de la perforación una longitud de 50 cm antes de bajar el piezómetro.

Al bajar el bulbo (cilindro poroso) piezométrico a su posición, se debe tener cuidado con los tramos de tubería acoplados para que no se fracturen durante la manipulación; el bulbo piezométrico debe asentarse sobre el relleno de arena, previamente vertido; una vez asentado, se vierte otra vez arena hasta alcanzar un espesor total de 1 m desde el fondo del barreno. En el caso de ademe metálico, se extrae nuevamente 50

cm para permitir que la arena descienda por completo. La zona piezométrica se sella al colocar sobre el empaque de arena, esferas de bentonita que se colocan en capas hasta alcanzar un espesor de 50 cm. Sobre este sello, se rellena el barreno con mortero arena-cemento-bentonita hasta 3 m de espesor, en proporciones de una parte de cemento por dos de arena en volumen y la bentonita al 3% en peso del cemento. En este proceso, después de colocar 50 cm de mortero se extrae el ademe otros 50 cm, para repetir el llenado de mortero hasta alcanzar el espesor señalado. Se continúa con el relleno de la perforación hasta llegar a una altura de 50 cm por debajo de la superficie libre del terreno. El tramo final de la tubería hacia la superficie se adapta para protegerse con un cajón de concreto armado con tapa metálica galvanizada y portacandado.

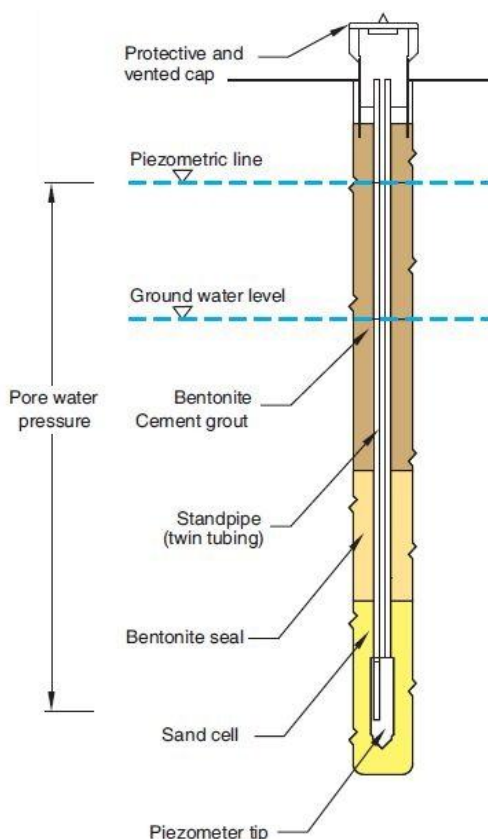


Figura 3.1: Piezómetro Casagrande.
Fuente: SISGEO – www.sisgeo.com – 2012 ²⁶

Cabe recalcar que en las presas al ser necesario colocar piezómetros en una misma ubicación pero a diferentes cotas, en la construcción será necesario utilizar el sistema multinivel o de piezómetros anidados, esto quiere decir que en la misma perforación se

deberán instalar un número determinado de piezómetros. O dependiendo del tipo de piezómetro de Casagrande adquirido según las recomendaciones del fabricante se podrá utilizar la forma de multinivel. En la Figura 3.2 se puede apreciar de forma más clara como se colocan piezómetros a diferentes cotas, claro está que en una presa es imposible utilizar la forma de agrupados pero si puede ser utilizado para laderas u otras zonas de interés.

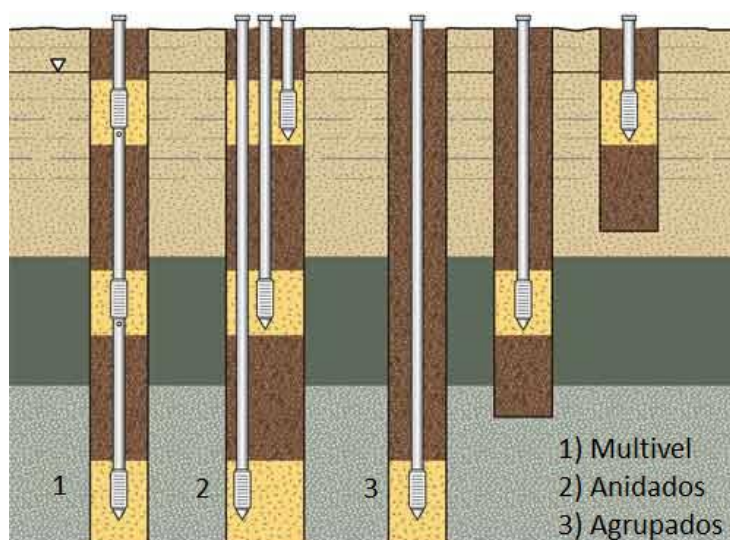


Figura 3.2: Formas de instalar piezómetros en un mismo punto.
Fuente: SOLINST. ²⁷

2.1.3.2 Funcionamiento piezómetro de Casagrande:

El piezómetro abierto funciona con el principio de los vasos comunicantes. Una celda o bulbo poroso capta el agua del interior del suelo en el punto de interés y la presión que actúa en ese punto la eleva a través de un ducto recto hasta una posición (columna de agua) que equilibra la presión en el bulbo piezométrico; la altura de la columna desde la elevación del bulbo piezométrico hasta el nivel del agua en la tubería, es la medida de la presión de poro en ese punto.

La variación de las presiones de poro se obtiene con la medición de las distancias de la superficie libre del agua en el ducto, respecto al nivel de elevación del brocal del tubo de PVC del piezómetro; con esta distancia y el nivel de elevación del bulbo piezométrico, se obtiene la longitud de la columna de agua que interesa.

La forma de tomar y anotar los datos se lo debe realizar de manera ordenada y periódica. Además siempre se debe usar el mismo formato para evitar equivocaciones en la manipulación de los mismos. En el Anexo 4 se presenta una tabla tipo que puede servir de referencia.

3.1.1 Hitos a utilizar en la presa Lechugal 2:

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de herramientas para la medición y cálculo de manera rápida, eficaz y precisa de los movimientos superficiales. El método más sencillo, económico y confiable que nosotros utilizaremos será la instrumentación superficial, que consiste en utilizar los datos topográficos para conocer los movimientos que se manifiestan en la superficie de la obra.

Para el cálculo de los movimientos en la presa Lechugal 2, tanto horizontales producidos por la presión hidrostática y los verticales producidos por el peso del dique, se utilizarán los bancos de referencia horizontales (BRCH) y verticales (BN) que constituyen la red primaria; situados fuera de la influencia de la presa y con su respectiva visibilidad entre ellos. Según las condiciones y la implantación de la presa lechugal 2, se va a localizar los hitos topográficos en las siguientes cotas y coordenadas que se presentan en las tablas. Véase la ubicación en el plano de hitos.

UBICACIÓN DE MONUMENTOS TOPOGRAFICOS							
SIMBOLO	TIPO	UBICACIÓN	NOMBRE	ABSCISA	COTA (mns)	COORDENADAS WGS84	
						X	Y
	BRCH	Estribo Derecho	BH-1	-	46	674186.23	9851221.10
	BRCH	Estribo Derecho	BH-2	-	40	674135.83	9851225.80
	BRCH	Estribo Derecho	BH-3	-	40	674216.16	9851193.11
	BRCH	Estribo Izquierdo	BH-4	-	49	673793.027	9850750.69
	BRCH	Estribo Izquierdo	BH-5	-	45	673787.73	9850795.40
	BRCH	Estribo Izquierdo	BH-6	-	45	673840.55	9850748.79

Tabla 3.5: Ubicación de monumentos BRCH.


UBICACIÓN DE MONUMENTOS TOPOGRAFICOS							
SIMBOLO	TIPO	UBICACIÓN	NOMBRE	ABSCISADO	COTA (mns)	COORDENADAS WGS84	
						X	Y
	BN	Estribo Derecho	BN-1	-	41	674136.31	9851215.97
	BN	Estribo Derecho	BN-2	-	41	674208.97	9851182.29
	BN	Estribo Izquierdo	BN-3	-	44	673799.01	9850800.81
	BN	Estribo Izquierdo	BN-4	-	44	673852.65	9850758.79

Tabla 3.6: Ubicación de monumentos BN.

De igual manera la localización de la red secundaria de los bancos de nivel en una zona estable y sin influencia de la presa. Estos estarán a la salida de la corona y en los estribos de la presa en forma escalonada a cada lado del talud aguas abajo. Las coordenadas y cotas son las siguientes:

UBICACIÓN DE MONUMENTOS TOPOGRAFICOS							
SIMBOLO	TIPO	UBICACIÓN	NOMBRE	ABSCISADO	COTA (mns)	COORDENADAS WGS84	
						X	Y
	Bns	Estribo Derecho	Bns-1	-	44.5	674186.23	9851221.11
	Bns	Estribo Derecho	Bns-2	-	44.5	674135.83	9851225.81
	Bns	Estribo Derecho	Bns-3	-	41	674158.95	9851144.86
	Bns	Estribo Derecho	Bns-4	-	38	674156.45	9851119.20
	Bns	Estribo Derecho	Bns-5	-	35	674156.12	9851095.54
	Bns	Estribo Izquierdo	Bns-6	-	46.5	673827.98	9850791.54
	Bns	Estribo Izquierdo	Bns-7	-	46.5	673834.62	9850786.07
	Bns	Estribo Izquierdo	Bns-8	-	41	673879.05	9850808.88
	Bns	Estribo Izquierdo	Bns-9	-	38	673897.74	9850819.02
	Bns	Estribo Izquierdo	Bns-10	-	35	673908.32	9850829.75

Tabla 3.6: Ubicación de monumentos Bns.

Por último, y basándonos en la longitud de 487.25 m y altura 23 m de la presa Lechugal 2, vamos a localizar los testigos superficiales para el movimiento horizontal (TSMH) a lo largo y extremos de la corona, y en la berma de la misma, con una separación de 50 m, comenzando desde la abscisa 0+50 lo cual será suficiente para la magnitud de la presa.

También la localización de los testigos superficiales para el movimiento vertical (TSMV) en la corona y en la berma con una separación de 50 m entre cada uno desde la abscisa 0+125.

Las coordenadas y longitudes de estos se encuentran en la siguiente tabla:



UBICACIÓN DE MONUMENTOS TOPOGRAFICOS							
SIMBOLO	TIPO	UBICACIÓN	NOMBRE	ABSCISADO	COTA (mnsn)	COORDENADAS WGS84	
						X	Y
○	TSMH	CORONA	TH-1	0+50	43	674149.46	9851182.48
	TSMH	CORONA	TH-2	0+50	43	674156.11	9851177.02
	TSMH	CORONA	TH-3	0+100	43	674117.64	9851143.78
	TSMH	CORONA	TH-4	0+100	43	674124.28	9851138.32
	TSMH	CORONA	TH-5	0+150	43	674085.88	9851105.16
	TSMH	CORONA	TH-6	0+150	43	674092.52	9851099.70
	TSMH	BERMA	TH-7	-	33	674112.99	9851082.87
	TSMH	CORONA	TH-8	0+200	43	674054.12	9851066.54
	TSMH	CORONA	TH-9	0+200	43	674060.77	9851061.08
	TSMH	BERMA	TH-10	-	33	674081.23	98510444.25
	TSMH	CORONA	TH-11	0+250	43	674022.43	9851028.00
	TSMH	CORONA	TH-12	0+250	43	674029.08	9851022.54
	TSMH	BERMA	TH-13	-	33	674049.54	9851005.71
	TSMH	CORONA	TH-14	0+300	43	673990.61	9850989.30
	TSMH	CORONA	TH-15	0+300	43	673997.25	9850983.84
	TSMH	BERMA	TH-16	-	33	674017.72	9850967.01
	TSMH	CORONA	TH-17	0+350	43	673958.85	9850950.68
	TSMH	CORONA	TH-18	0+350	43	673965.49	9850945.22
	TSMH	BERMA	TH-19	-	33	673985.96	9850928.39
	TSMH	CORONA	TH-20	0+400	43	673927.09	9850912.06
	TSMH	CORONA	TH-21	0+400	43	673933.73	9850906.60
	TSMH	BERMA	TH-22	-	33	673954.20	9850889.77
	TSMH	CORONA	TH-23	0+450	43	673895.33	9850873.44
	TSMH	CORONA	TH-24	0+450	43	673901.98	9850867.98
	TSMH	BERMA	TH-25	-	33	673922.44	9850851.15
	TSMH	CORONA	TH-26	0+500	43	673863.58	9850834.83
	TSMH	CORONA	TH-27	0+500	43	673870.22	9850829.36
	TSMH	CORONA	TH-28	0+537	43	673839.98	9850806.13
	TSMH	CORONA	TH-29	0+537	43	673846.62	9850800.67

Tabla 3.7: Ubicación de monumentos TSMH.



UBICACIÓN DE MONUMENTOS TOPOGRAFICOS							
SIMBOLO	TIPO	UBICACIÓN	NOMBRE	ABSCISADO	COTA (mns)	COORDENADAS WGS84	
						X	Y
	TSMV	CORONA	TV-1	0+125	43	674101.76	9851124.47
	TSMV	CORONA	TV-2	0+175	43	674070.00	9851085.85
	TSMV	BERMA	TV-3	-	33	674097.11	9851063.56
	TSMV	CORONA	TV-4	0+225	43	674038.31	9851047.31
	TSMV	BERMA	TV-5	-	33	674065.42	9851025.02
	TSMV	CORONA	TV-6	0+275	43	674006.49	9851008.61
	TSMV	BERMA	TV-7	-	33	674033.60	9850986.32
	TSMV	CORONA	TV-8	0+325	43	673974.73	9850969.99
	TSMV	BERMA	TV-9	-	33	674001.84	9850947.70
	TSMV	CORONA	TV-10	0+375	43	673942.97	9850909.08
	TSMV	BERMA	TV-11	-	33	673970.08	9850909.08
	TSMV	CORONA	TV-12	0+425	43	673911.21	9850892.75
	TSMV	BERMA	TV-13	-	33	673938.32	9850870.46
	TSMV	CORONA	TV-14	0+475	43	673938.32	673879.46

Tabla 3.8: Ubicación de monumentos TSMV.

Para la localización de los hitos topográficos en la presa Lechugal 2, se seleccionó los 2 puntos más críticos, que son la corona y la berma. La corona estará afectada por el peso propio del cuerpo de la presa, el paso de automóviles y circunstancias del llenado vaciado de la misma. La berma ya que está situada en el talud aguas abajo y es muy importante para la estabilidad y reducción de las aguas que escurren, evitando la erosión.

En estos puntos si existe la posibilidad de la instalación de los testigos fácilmente, pero en las laderas afuera de la influencia de la presa se va a necesitar de una previa nivelación y limpieza del terreno para una perfecta instalación.

Los movimientos se realizaran a corto y largo plazo, por lo que las mediciones se realizaran al terminar la construcción de la obra, en el primer llenado y en el primer vaciado, ya que aquí se producirá el asentamiento más brusco por la diferencia de presiones que ejerce el agua en el talud aguas arriba. Estas serían las 3 principales mediciones que se debe hacer, luego se realizar periódicamente según la regularidad de los movimientos que en esta se presente.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- El proyecto de instrumentación para el monitoreo de las presas del proyecto PACALORI parte de la necesidad de mantener un control y obtención de datos para garantizar la seguridad y vida útil de las presas ya que con la adecuada auscultación se evitan daños graves a la infraestructura del proyecto. Por lo tanto la instrumentación se convierte en una parte fundamental e importante en el correcto funcionamiento de las presas.
- Se instalarán 29 piezómetros abiertos tipo Casagrande, porque no se necesita conocer la presión de poros al final de construcción de la presa, sino medir y controlar la ubicación de la LCS cuando la presa se encuentre en operación. Una vez ubicada esta zona, los piezómetros revelarán si la presión está aumentando, por lo tanto la LCS sube y este efecto pone en riesgo la estabilidad del talud aguas abajo en la etapa de operación.
- La localización de los piezómetros se estableció, según las necesidades de monitoreo, en los lugares críticos de la presa, así como también en la facilidad o acceso a la instalación de estos aparatos. Estas zonas, como la corona y bermas, proporcionan las condiciones adecuadas para que la maquinaria pueda trabajar con normalidad y precisión.
- El proyecto de instrumentación de una presa no tiene que convertirse en una carga al contratista encargado de la construcción de la presa. Por este motivo los piezómetros tipo Casagrande, al medir la presión de poros solo en terrenos saturados, deben colocarse finalizada la construcción de la presa. Por lo tanto, se facilitan las perforaciones y colocación de tubos en los lugares establecidos, sin que corran el riesgo de tener algún desperfecto o rotura durante la construcción de la presa.
- Uno de los principales motivos de la selección de los piezómetros de tipo Casagrande tiene que ver con la economía del proyecto, ya que al existir un presupuesto limitado, en grandes proyectos como lo es PACALORI con 13 presas en su diseño definitivo, la instrumentación debe ser la justa y necesaria. Esto quiere decir que se tiene que instalar instrumentos que cumplan las



expectativas y necesidades para un correcto control y monitoreo. Esto lo pueden realizar los piezómetros de Casagrande, por el tipo de control que se necesita realizar en la etapa de operación de las presas.

- Como el régimen de lluvias en las cuencas del proyecto PACALARI muestra una marcada época lluviosa y otra de seca, es necesario el control de la Línea de Corriente Superior en el cuerpo de la presa. Con los piezómetros se puede tener un registro de estas variaciones y estar al tanto del real funcionamiento de la presa y si esta se verá afectada por el aumento excesivo en la presión de poros.
- Como el embalse afecta todo el entorno donde se encuentra ubicada la presa, es necesario colocar piezómetros de control en los estribos, así medir la infiltración en estas zonas que se podrían deslizar y afectar estructuralmente el soporte de la presa.
- En la presente tesis se analizó y realizó el proyecto de instrumentación en la presa Lechugal 2, perteneciente al trasvase 2 del PACALORI. Esta presa presenta las características más favorables para realizar este estudio, ya que por su longitud y altura se convierte en una de las presas más grandes de todo el proyecto. Por lo tanto, la instrumentación que se presenta en este trabajo puede ser proyectada al resto de las 12 presas, ya que todas tienen iguales características de diseño.
- La instrumentación superficial con 63 hitos y monumentos en total, tiene la misma prioridad e importancia que los piezómetros en un proyecto de la magnitud de la presa de Lechugal 2, ya que éstos pueden brindar información muy relevante sobre los movimientos que están ocurriendo durante el funcionamiento de la presa. Las cargas externas como la del agua y el peso propio de la estructura, provocarán deformaciones y asentamientos que están dentro de los parámetros de diseño, pero esto no significa que no se deben medir. Por lo tanto, la función de los hitos y monumentos es brindar una herramienta de fácil uso para el control de dichos movimientos y así conocer el comportamiento de la presa.
- No se debe escatimar en el número de hitos y monumentos que se puedan colocar en la presa, ya que al ser económicos y de fácil construcción es mejor abarcar zonas completas de control, como lo son la corona y la berma. Es necesario también colocar la red primaria y secundaria de tal manera que en caso de movimientos muy fuertes de la presa, no se vean afectados y así siempre tener los mismos puntos de referencia con el menor error posible.



- Es necesario que el encargado de realizar las mediciones de control utilice instrumentos modernos (Estación Total - Nivel) y en buen estado. El uso del GPS para confirmar las coordenadas de ubicación de los monumentos es esencial y útil, ya que pueden ser destruidos por personas ajenas al proyecto y, por lo tanto tendrían que ser construidas de nuevo.
- Un resultado integral de todas las mediciones que se puedan obtener en el control y monitoreo de la presa, servirá para generar un análisis detallado de las operaciones de mantenimiento que se deban efectuar en un futuro. Así, la subsistencia de la obra siempre estará previsto en planes de contingencia en caso de ser necesario y se evitará reparaciones de última hora y temporales.
- En general podemos decir que el estudio de instrumentación de una presa es parte fundamental del proyecto final. La seguridad en una obra de importancia social siempre se convertirá en una prioridad, por lo tanto, la inversión de dinero que se debe realizar para la colocación de la instrumentación recomendada no debe ser un motivo para reducir el alcance de la misma y ahorrarse unos dólares. Sin el control necesario, la obra, puede fracasar sin previo aviso y sus efectos serán mucho peores económicamente hablando, en comparación de lo que sería una buena inversión en control y monitoreo de la presa.

RECOMENDACIONES:

- Si el proyecto tiene los fondos suficientes para un buen control geotécnico, se recomienda que se lo haga desde la etapa de construcción, para luego pasar a la etapa de operación.
- Es recomendable que se haga una inspección de la localización de los piezómetros y monumentos del proyecto y así verificar que no existan inconvenientes u obstáculos para su construcción e instalación.
- Es necesario una socialización a todas las comunidades aledañas al proyecto. Pedirles que se apersonen de las obras, ya que ellos son los principales beneficiarios. Que se interesen en conocer todas las partes del proyecto, qué instrumentación se deja instalada, el cuidado que se debe tener con las mismas y que se evite el daño innecesario, ya que con ellas se recolectarán los datos del funcionamiento de las presas. Además tener un número de emergencias y denuncias por alguna eventualidad generada por personas extrañas al proyecto.



- Los datos de monitoreo de una presa de tierra permiten analizar el comportamiento de los materiales que constituyen el cuerpo de la obra. Por lo tanto, es necesario que la persona encargada de la toma de datos sea un Técnico capacitado en la manipulación de la instrumentación, y pueda estar atento a irregularidades presentes que deban ser corregidas o notificadas.
- Durante el primer llenado y vaciado de la presa, se deberán hacer mediciones principalmente de los movimientos que se efectúen antes y después de esas condiciones, ya que la experiencia internacional demuestra que la mayoría de los deslizamientos se producen en el primer llenado.
- Enfocándonos directamente en el proyecto PACALORI, y conociendo como se constituye su régimen de clima, con épocas marcadas de lluvia y sequía, se recomienda realizar mediciones de los movimientos de las presas al inicio y final de cada una de estas temporadas.
- Es necesario recalcar que las estaciones totales, GPS, y niveles siempre se deben dar mantenimiento y una adecuada calibración antes de ser utilizados en las mediciones.
- Para la instalación de los piezómetros, se debe garantizar la verticalidad de la perforación, ya que esto generará un correcto funcionamiento del instrumento. Inmediatamente colocados los tubos piezométricos se deberá construir el cajón de protección para evitar desperfectos por la maquinaria que estará trabajando en el mantenimiento de la presa.
- El constructor deberá coordinar con el proveedor de los piezómetros capacitaciones para la correcta instalación, calibración y forma de uso de la instrumentación adquirida. Así mismo, entregar manuales en español del equipo para el mantenimiento y reparación en caso de desperfectos.
- Todos los piezómetros y monumentos deben ser identificados con nombres y números en su instalación. Es recomendable instalar placas con estos datos y además las coordenadas geográficas del lugar.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. Luis González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortuño & Carlos Oteo. *Ingeniería Geológica*. (Pearson Educación S.A., 2004).
2. Mariano Ruiz Vázquez & Silvia González Huesca. *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil*. (Limusa, 2009).
3. R. Marsal & D. Reséndiz. *Presas de Tierra y Enrocamiento*. (Limusa, 1975).
4. Rolando Armas Novoa & Evelio Horta Mestas. *Presas de Tierra*. (ISPJAE, 1987).
5. PROMAS - Universidad de Cuenca. Tomo 9: Estudio de Impacto Ambiental Preliminar y Sociabilización del Proyecto - Fase de Factibilidad - PACALORI. (2014).
6. PROMAS - Universidad de Cuenca. Tomo 7: Diseño Básicos de Obras Civiles, Ingeniería Hidráulica y Sistemas de Riego - Capítulo 1: Presas y Obras Anexas - Fase de Factibilidad PACALORI. (2014).
7. Alfredo Luis Serafino. Auscultación de Obras.
8. Auscultación y taller de Ingeniería S.A. Redacción del plan de auscultación, revisión del sistema de auscultación, casos especiales. (2013). at <www.atiinfo.net>
9. P. Novak, A. Ib. Moffat & C. Nalluri. in *Estructuras Hidráulicas* 599 (Mc Graw-Hill, 2001).
10. Mónica Paola Saldarriaga E. Instrumentación de Presas. at <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/medidores/instrumentacionpresas/instrumpresas.html>>
11. James Sherard, Sc.D. *Earth and earth - rock dams*. (Instituto del Libro, 1970).
12. Comisión Nacional del Agua CONAGUA - México DF. *Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas*.
13. Álvaro F. De Matteis. Geología y Geotecnia - Tema: Estabilidad de Taludes. (2003).



14. PROMAS - Universidad de Cuenca. Tomo 4 - Informe componente Geológico y Geotecnia - Traslase 2 - Fase de Factibilidad. (2013).
15. Victoria Rivas García. Técnicas experimentales en hidráulica - Control hidráulico en presas de materiales sueltos.
16. CIRSOC - Reglamento Argentino. Reglamento CIRSOC 401 - Cap. 4: Excavaciones, perforaciones, muestreo y ensayos en perforaciones. (2006). at <<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/401.htm>>
17. Jaime Suarez. in 1, 588 (2009).
18. Varios. Procedimientos de investigación. at <<http://dc96.4shared.com/doc/AxknYY1F/preview.html>>
19. José Joaquín Vila Ortega, Gonzalo Jiménez Cleves & Julián Garzón Barrero. Monitoreo y Control Topográfico de Obras. (2012).
20. Geodata Andina. (2014). at <www.geodataandina.cl>
21. Colocación de Bancos de Nivel. *Colocación de bancos de nivel S.E. Chihuahua potencia* (2014). at <fotos.habitissimo.com.mx>
22. GeoConcept. Catálogo de Instrumentación Topográfica GeoConcept. at <www.geoconcept.es>
23. Pilar de Observación. *TOPOCAD* (2014). at <<http://www.topocad.es/index.html>>
24. Asociación PRODUNAS. Señalización de deslindes mediante mojones a lo largo del litoral y zonas dunares de Marbella. (2014). at <www.produnas.org>
25. INEGI. Red Geodésica Vertical. (2014). at <www.inegi.org.mx>
26. SISGEO. Instrumentación Geotécnica SISGEO - Datos de Productos. (2012). at <www.sisgeo.com>
27. Solinst. Sistemas multiniveles y remediación. (2013). at <<http://www.solinst.com/espanol/productos/ds/sistemas-multinivel.php>>



ANEXOS