

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Guía para la instrumentación
geotécnica de proyectos
hidroeléctricos

BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Guatemala
2009

Guía para la instrumentación
geotécnica de proyectos
hidroeléctricos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Guía para la instrumentación
geotécnica de proyectos
hidroeléctricos

Trabajo de investigación presentado por Ann Julie
Castellanos Ipiña, para optar al grado académico de
Licenciada en Ingeniería Civil

BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

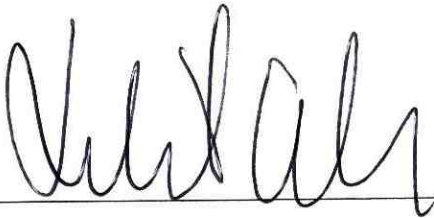
Guatemala
2009

Vo. Bo. :

(f) 

(Ing. Fernando Rafael Callejas Benítez)

Tribunal Examinador:

(f) 

(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f) 

(Ing. Fernando Rafael Callejas Benítez)

(f) 

(Ing. José Julio Pantoja Prera)

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2009.

ÍNDICE

Contenido	Página
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE ILUSTRACIONES	x
RESUMEN	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. Objetivos generales:.....	2
B. Objetivos específicos:.....	2
III. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	3
A. Tipos de centrales hidroeléctricas.....	4
1. Centrales de agua fluente (centrales al filo de agua).	4
2. Centrales de agua embalsada.	5
B. Componentes de una central hidroeléctrica	9
1. Presa.....	9
2. Tomas de agua.	14
3. Canal de derivación	15
4. Chimenea de equilibrio.....	15
5. Canal de descarga de agua.....	15
6. Aliviaderos.....	15
7. Casa de máquinas.	16
8. Estación o subestación eléctrica.	16
IV. AUSCULTACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS.....	17
A. Instrumentación	18
1. Aplicación y objetivos.	18
2. Planeación de la instrumentación	19
3. Adquisición y manejo de la información.....	20
B. Parámetros en la auscultación de proyectos hidroeléctrico	20
C. Principios de diseño para la auscultación de proyectos hidroeléctricos	21

D. Tipos de auscultación.....	21
1. Auscultación hidráulica	21
2. Auscultación térmica.....	22
3. Auscultación sísmica	23
4. Auscultación de deformación.....	23
5. Auscultación de esfuerzos.....	24
6. Auscultación geodésica.....	24
V. NORMAS PARA LA AUSCULTACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS EN GUATEMALA.....	27
A. Vigilancia.....	29
1. Artículo 28. Estándares.....	29
2. Artículo 29. Inspecciones regulares y especiales.....	29
3. Artículo 30. Instrumentación	29
4. Artículo 31. Pruebas	30
VI. INSTRUMENTACIÓN.....	31
A. Extensómetros.....	31
1. Extensómetro de cinta.....	33
2. Extensómetro de barra	35
3. Extensómetro de fibra flexible.....	40
B. Inclínómetro.....	41
1. Inclínómetro uniaxial.....	49
2. Inclínómetro biaxial.....	50
3. Inclínómetro biaxial resistente.....	51
4. Inclínómetro de barra.....	52
5. Inclínómetro portátil	53
C. Piezómetros.....	54
1. Equipos de sistema abierto.....	54
2. Equipos de sistema cerrado.....	56
3. Piezómetros neumáticos.....	56
4. Piezómetros de cuerda vibrante	57
D. Celdas de presión total.....	60

1.	Celdas de presión para estructuras de concreto	60
2.	Celdas de presión para rellenos o terraplenes	61
E.	Celdas de carga	61
1.	Celda de carga hidráulica.....	61
2.	Celdas de carga neumáticas	63
3.	Celdas de carga basadas en galgas extensiométricas	63
4.	Celdas de carga de tensión y compresión	64
5.	Celdas de carga de resistencia eléctrica	64
6.	Celdas de carga de cuerda vibrante.....	66
F.	Péndulos.....	66
1.	Péndulo directo	67
2.	Péndulo inverso	67
G.	Sismógrafo.....	68
1.	Sismógrafos mecánicos.....	69
2.	Sismógrafos electromagnéticos	69
3.	Sismógrafos de banda ancha.....	69
4.	Sismógrafos de deformación	70
5.	Acelerógrafos.....	70
H.	Medidor de juntas o grietas.....	70
VII.	Guía de instrumentación geotécnica para la auscultación de proyectos hidroeléctricos	71
A.	Descripción general	71
B.	Planos de ubicación	72
C.	Auscultación por elemento	72
1.	Presa.....	72
2.	Túnel.....	75
3.	Canal.....	77
4.	Tubería forzada.....	80
5.	Casa de máquinas	82
6.	Obras auxiliares	84
VIII.	Propuesta de monitoreo para el proyecto hidroeléctrico de Poza Verde	87
A.	Descripción del proyecto	87

1.	Primera etapa: 1.5 MW en 1,985	87
2.	Segunda etapa: 8.34 MW en 2,000	87
3.	Tercera etapa 1: 2.0 MW en 2,007	87
4.	Tercera etapa 2: 12.5 MW en 2,007	88
5.	Tercera etapa:	88
6.	Cuarta etapa: 18 MW en 2,010	88
B.	Ubicación del proyecto	90
C.	Auscultación de elementos	92
D.	Auscultación del proyecto	103
1.	Presa	104
2.	Túnel:	114
3.	Canal:	114
4.	Tubería forzada	115
5.	Casa de máquinas.	116
IX.	CONCLUSIONES	117
X.	RECOMENDACIONES	118
XI.	BIBLIOGRAFÍA	119
XII.	APÉNDICES	121
A.	Indicadores cualitativos, sus orígenes y efectos	121
1.	Presas de fábrica	121
2.	Presas de materiales sueltos	123
3.	Estructuras auxiliares	125
4.	Embalse	127
5.	Zonas aguas abajo	128
B.	Posibles medidas en situaciones de emergencia	129
C.	Clasificación del proyecto hidroeléctrico en función del riesgo potencial	132

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Instrumentos utilizados para cada parámetro de monitoreo	20
Información general.....	71
Auscultación de presas	72
Auscultación de túneles	75
Auscultación de canales.....	77
Auscultación de tubería forzada	80
Auscultación de casa de máquinas.....	82
Auscultación de obras auxiliares	84
Información general.....	88
Auscultación de presa	92
Auscultación de túnel	95
Auscultación de canal	97
Auscultación de tubería forzada	99
Auscultación de casa de máquinas.....	101
Indicadores cualitativos en presas de fábrica.....	121
Indicadores cualitativos en presas de materiales sueltos	123
Indicadores cualitativos en estructuras auxiliares.....	125
Indicadores cualitativos en el embalse.....	127
Indicadores cualitativos en zonas aguas abajo.....	128
Posibles medidas en situaciones de emergencia.....	129
Clasificación del proyecto hidroeléctrico en función del riesgo potencial	132

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
Esquema general de central hidroeléctrica	3
Esquema de una central de agua fluente	4
Esquema de una central de agua embalsada	5
Esquema de una central de regulación.....	6
Esquema de una central de bombeo.....	7
Fotografía de presa	10
Presa de gravedad	11
Presa aligerada con contrafuertes	12
Presa de muro curvo	13
Presa de tierra	14
Presa mixta.....	14
Esquema de un extensómetro horizontal. Detalle del sistema de suspensión.....	32
Esquema de un extensómetro horizontal de cinta.....	33
Extensómetro de cinta.....	34
Método de instalación para puntos de referencia.....	35
Extensómetro de barra	36
Extensómetro de posición múltiple.....	36
Extensómetro recuperable para pozos	38
Extensómetro para rellenos.....	39
Extensómetro para roca	40
Extensómetro de fibra flexible para pozos	41
Extensómetro flexible para pozos.....	41
Esquema de medición de desplazamientos de los inclinómetros.....	42

Inclinómetro horizontal con tubería accesible en ambos extremos	42
Inclinómetro horizontal con tubería accesible en un extremo	43
Inclinómetro vertical.....	43
Inclinómetro vertical.....	44
Inclinómetro horizontal	44
Tuberías inclinométricas. a) Diámetro de fabricación de la tubería. b) Vista de las ranuras de las tuberías inclinométricas	45
Sonda inclinométrica. a) Esquema de sonda inclinométrica. b) Inspección de tubería con la sonda inclinométrica	46
Sonda inclinométrica	46
Unidad lectora portátil	47
Esquema de colocación del sistema polea-freno en la tubería inclinométrica.....	48
Esquema del sistema polea-freno	48
Carrete para el almacenaje del cable eléctrico.....	49
Inclinómetro uniaxial.....	49
Inclinómetro biaxial.....	50
Inclinómetro con servo-acelerómetros diferencial.....	51
Inclinómetro biaxial resistente.....	52
Medida de desplazamientos en inclinómetros de barra	52
Desplazamientos acumulados a lo largo de perfiles horizontales.....	52
Inclinómetro de barra.....	53
Inclinómetro portátil	54
Piezómetro Casagrande	55
Piezómetro neumático	57
Piezómetro de cuerda vibrante.....	58
Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante	59
Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante	59

Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante	60
Celda de carga hidráulica.....	62
Esquema de aplicación típica de celda de carga hidráulica	62
Celda de carga de compresión	64
Celda de carga de tensión y compresión.....	64
Celda de carga para anclaje	65
de instalación típica de celda de carga para anclajes	66
Esquema de péndulo directo e inverso	67
Medidor de juntas electromecánico	70
Hidroeléctrica Poza Verde	88
Ubicación hidroeléctrica Poza Verde	90
Instrumentación geotécnica para el proyecto hidroeléctrica Poza Verde	91
Ubicación de termómetros.....	104
Ubicación de piezómetros de sistema cerrado	105
Instalación de piezómetros de sistema cerrado.....	105
Lectura de piezómetros de sistema cerrado	105
Ubicación de piezómetros de sistema abierto.....	106
Instalación de piezómetros de sistema abierto.....	106
Ubicación de celdas de carga.....	107
Celdas de carga	107
Ubicación de péndulos.....	108
Instalación de péndulos.....	108
Instalación de péndulos.....	109
Lectura de péndulos.....	109
Ubicación de extensómetros de cinta.....	109
Extensómetros de cinta para presa.....	110

Ubicación de extensómetros de barra	110
Instalación de extensómetros de barra	111
Ubicación de inclinómetros	111
Instalación de inclinómetros	112
Lectura de inclinómetros	112
Ubicación de medidores de juntas	113
Instalación de medidores de juntas	113
Lectura de medidores de juntas	113
Túnel y ubicación de extensómetros.....	114
Canal.....	114
Tubería forzada.....	115
Casa de máquinas	116

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal generar una guía de referencia para implementar la instrumentación geotécnica para medir las distintas magnitudes físicas (presión, temperatura, deformación, variación de ángulos, tensión, etc.) y sus variaciones en los diferentes elementos de un proyecto hidroeléctrico. Los instrumentos de medición en los que se centra el trabajo de investigación son: extensómetros, inclinómetros, piezómetros, péndulos, celdas de carga y medidores de deformación. El trabajo consiste en recopilar y presentar la información disponible sobre instrumentación geotécnica.

El control y monitoreo de proyectos hidroeléctricos, P.H., son de gran importancia ya que de esta manera se determinan y reducen los riesgos mediante el conocimiento del comportamiento físico real de los diferentes elementos. La guía proporciona, al mismo tiempo, una gran ayuda para confirmar las condiciones tomadas en cuenta en el diseño preliminar.

El trabajo incluye una clasificación y descripción de los distintos tipos de presas según su modo de funcionamiento y la importancia de esta información radica en que dependiendo de las características del proyecto y de las condiciones dadas, se determinan los controles físicos importantes en cada caso, y éstos a su vez determinarán los instrumentos geotécnicos necesarios.

Previo a la elaboración de la guía geotécnica, se expone una descripción de las características, el funcionamiento y el modo de instalación de los instrumentos utilizados en estos tipos de mediciones. Esta información permite identificar los instrumentos adecuados para cada tipo de proyecto y elemento, según la clasificación previamente elaborada con respecto a las variables que resultan importantes en cada caso.

Finalmente, se presenta una propuesta de monitoreo para la hidroeléctrica Poza Verde, la cual ilustra la forma de empleo de la guía, su importancia y utilidad para el control del comportamiento de estas estructuras.

La presente guía está basada en numerosas fuentes bibliográficas, relacionadas a la auscultación de proyectos hidroeléctricos e instrumentación geotécnica, que han sido evaluadas y adaptadas a las condiciones de nuestro país y al tipo de estructuras que en él se construyen.

I. INTRODUCCIÓN

Los proyectos hidroeléctricos han tenido un gran auge en los últimos años debido a los numerosos beneficios que brindan a la población por tratarse energías renovables, y por lo tanto cada vez es más importante tener un control del comportamiento de los distintos elementos estructurales que los componen. El conocimiento del comportamiento físico real de estos elementos permite determinar y reducir los altos riesgos potenciales que se encuentran en este tipo de estructuras, así como también contribuyen a mejorar el diseño preliminar de cada proyecto. Es decir, son grandes medidas de seguridad que permiten identificar cualquier tipo de falla que pueda resultar en daños a poblaciones o estructuras adyacentes.

A modo de compensar la falta de información disponible, los métodos de cálculo de ingeniería se basan en métodos de cálculo ajustados que incorporan altos factores de seguridad, obtenidos a partir de una combinación de estimaciones basadas en el comportamiento y propiedades de los materiales utilizados. Sin embargo, no puede estimarse con exactitud el efecto que las funciones que se desarrollen, las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales provocarán en el comportamiento real de la estructura.

Es posible disminuir la incertidumbre que existe en los parámetros de interés, evaluando las acciones realmente actuantes y sus efectos, por medio de la medición de esfuerzos y deformaciones sobre los elementos críticos. De este modo, se alcanzan reducciones en los factores de seguridad de partida y se obtienen diseños más óptimos, al mismo tiempo que se garantiza la seguridad estructural. Se presenta esta guía con el objetivo de apoyar los programas de monitoreo en proyectos hidroeléctricos en Guatemala y optimizar futuras construcciones de este tipo.

Por otro lado, El Ministerio de Energía y Minas, MEM, exige que los proyectos hidroeléctricos que se desarrollan en Guatemala se mantengan bajo ciertos parámetros durante y después de la construcción. La implementación de una guía de instrumentación geotécnica definitivamente contribuirá en gran medida a apoyar esta normativa. Esta referencia suministrará una base para los usuarios en cuanto al procedimiento adecuado para la medición de las variables involucradas en los parámetros de control que se exigen según el tipo y magnitud de proyecto.

II. OBJETIVOS

A. Objetivos generales:

- Proveer una guía para la instrumentación geotécnica en proyectos hidroeléctricos.
- Describir los tipos de instrumentos geotécnicos disponibles para proyectos hidroeléctricos.
- Describir el funcionamiento y modo de empleo de los instrumentos geotécnicos.
- Conocer las obras e identificar la instrumentación más adecuada a cada situación.

B. Objetivos específicos:

- Preparar una guía funcional y práctica para un adecuado control de proyectos hidroeléctricos.
- Presentar un ejemplo de la utilización de la guía elaborada para la instrumentación en proyectos hidroeléctricos.
- Conocer los medios, métodos y técnicas de instrumentación geotécnica.
- Conocer la importancia y necesidad de una adecuada medición de las propiedades físicas en proyectos hidroeléctricos.

III. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

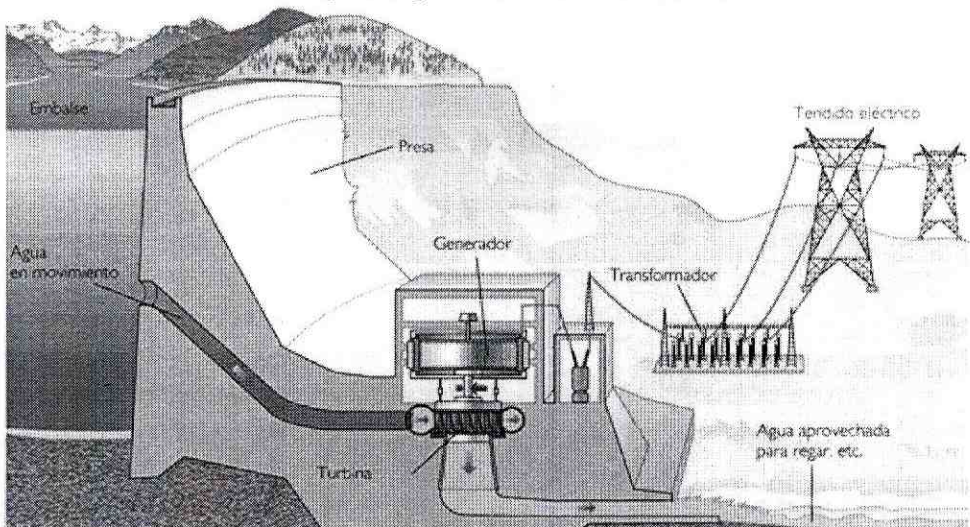
Las centrales hidroeléctricas son estaciones desde las cuales se aprovecha la energía potencial del agua almacenada y se convierte, primero en energía mecánica y luego en energía eléctrica, mediante la caída del agua desde cierta altura a un nivel inferior. A la energía que proviene del agua se le llama Energía Hidráulica, y del sitio de dónde se obtiene, Central Hidroeléctrica.

La presa retiene el agua del río provocando un embalsamiento y un aumento del nivel del agua. Al pie de la presa está la sala de máquinas con los grupos turboalternadores. El agua llega a las turbinas a través de una tubería forzada alimentada desde el embalse por las presas de agua, equipadas con compuertas y enrejados para regular el flujo y evitar el paso de elementos no deseados.

La energía potencial del agua embalsada se convierte en energía cinética al abrir las compuertas del conducto que comunica al rodillo de la turbina, y luego conduce el agua por los canales de desagüe hasta llegar de nuevo al río. El desnivel del agua desarrolla un movimiento rotacional en las ruedas hidráulicas o turbinas que, a su vez, accionan un generador eléctrico, el cual producirá la energía eléctrica. Solidario al eje de la turbina, está el rotor del alternador y un generador de corriente continua que genera un campo magnético en las bobinas del rotor, con lo cual se produce en el bobinado del estator una corriente alterna de tensión de mediana y elevada intensidad. Con los transformadores se eleva la tensión y a través del parque de distribución o directamente se alimentan las líneas de la red de transporte.

A continuación se muestra el esquema general de una central hidroeléctrica.

Ilustración 1: Esquema general de central hidroeléctrica



Fuente: <http://www.renovables-energia.com/wp-content/uploads/2009/06/partes-central-hidroelectri.jpg>

A. Tipos de centrales hidroeléctricas

Se pueden clasificar bajo varios argumentos, como características técnicas, peculiaridades del asentamiento y condiciones de funcionamiento. En primer lugar, hay que distinguir las que utilizan el agua según discurre normalmente por el cauce de un río, y aquellas otras a las que ésta llega, convenientemente regulada, desde un lago o pantano. Se pueden clasificar entonces en:

- Centrales de agua fluente
- Centrales de agua embalsada:
 - o Centrales de regulación
 - o Centrales de bombeo.

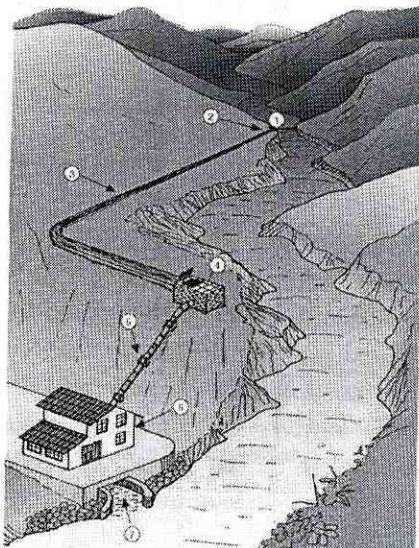
Por otro lado, las podemos clasificar según la altura del salto de agua o desnivel existente:

- Centrales de alta presión
- Centrales de media presión.
- Centrales de baja presión

1. Centrales de agua fluente (centrales al filo de agua). Se construyen en los lugares en que la energía hidráulica debe ser utilizada en el instante en que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas. No cuentan prácticamente con reserva de agua, oscilando el caudal suministrado según las estaciones del año. En la temporada de precipitaciones abundantes, desarrollan su potencia máxima, y dejan pasar el agua excedente. Durante la época seca, la potencia disminuye en función del caudal, llegando a ser casi nulo en algunos ríos en la época del estío. Su construcción se realiza mediante presas sobre el cauce de los ríos, para mantener un desnivel constante en la corriente de agua.

El esquema de una central de este tipo puede ser el siguiente:

Ilustración 2: Esquema de una central de agua fluente



Fuente: <http://garcia-egocheaga.com/tecnicatipos.html>

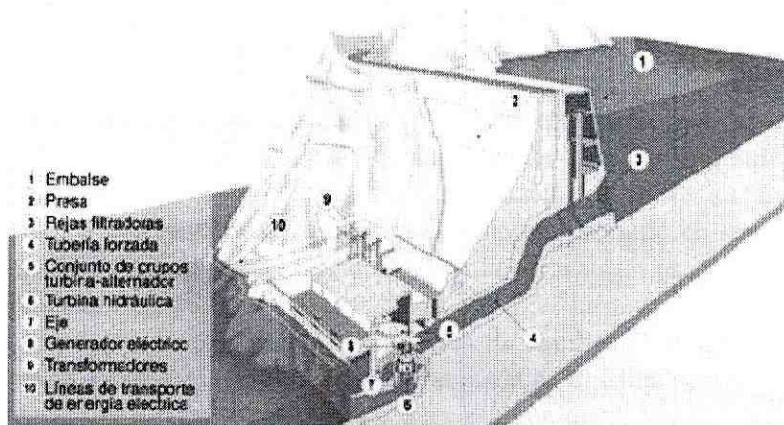
2. Centrales de agua embalsada. Con embalse de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses, cosa que sería imposible en un proyecto de central de agua fluyente.

Se alimenta del agua de grandes lagos o de pantanos artificiales, conseguidos mediante la construcción de presas. El embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando a elevados porcentajes de captación de agua en ocasiones. Esta agua se utiliza según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas. Tienen por objeto sustituir total o parcialmente la producción de una central de agua fluyente, en caso de avería o reparación.

En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido aguas arriba de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales. El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas.

Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de agua fluyente, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir kilovatios-hora más baratos.

Ilustración 3: Esquema de una central de agua embalsada

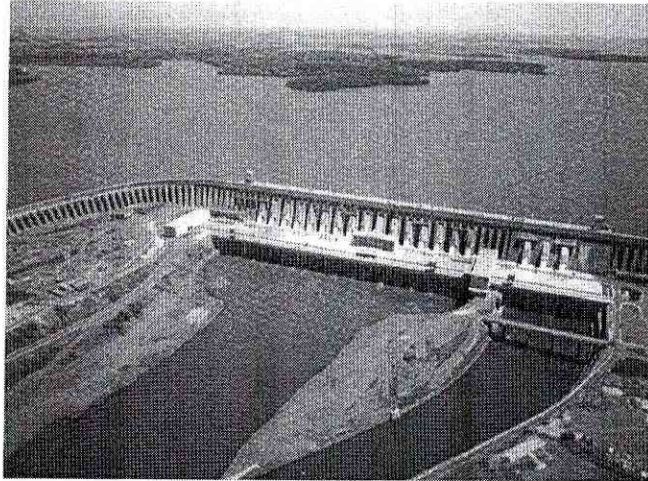


Fuente: <http://hidroimpacto.blogspot.com/>

En el lugar apropiado por la topografía del terreno, se ubica la obra de toma de agua, y el líquido se lleva por medio de canales, o tuberías de presión, hasta las proximidades de la casa de máquinas. Allí se instala la chimenea de equilibrio, a partir de la cual la conducción tiene un declive más pronunciado, para ingresar finalmente a la casa de máquinas, la cual suele estar al pie de la presa en estos tipos de central. La chimenea de equilibrio es un simple conducto vertical que asegura que al cerrar las válvulas de la central, la energía cinética que tiene el agua en la conducción, se libere en ese elemento como un aumento de nivel y se transforme en energía potencial. Los desniveles en este tipo de central suelen ser mayores comparados con los que se encuentran en otros tipos de centrales.

a. **Centrales de regulación.** Tienen la posibilidad de almacenar volúmenes de agua en el embalse, que representan periodos más o menos prolongados de aportes de caudales medios anuales. Prestan un gran servicio en situaciones de bajos caudales, ya que el almacenamiento es continuo, regulando de modo conveniente para la producción. Se adaptan bien para cubrir horas punta de consumo.

Ilustración 4: Esquema de una central de regulación



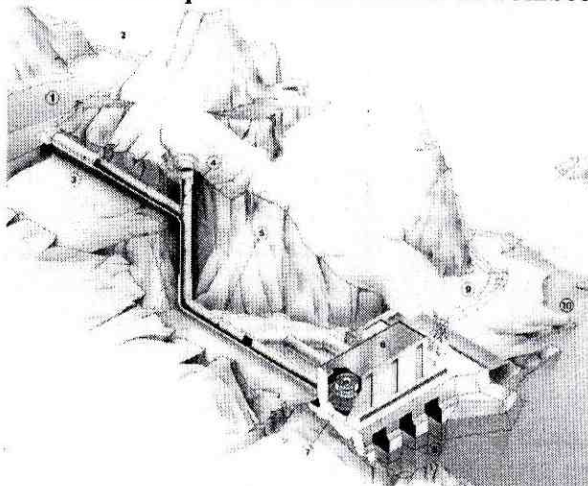
Fuente: <http://centros5.pntic.mec.es/.../5.htm>

b. **Centrales de bombeo.** Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que posibilitan un empleo más racional de los recursos hidráulicos de un país. Acumulan caudal mediante bombeo, con lo que su actuación consiste en acumular energía potencial. Estas centrales hidroeléctricas aprovechan la energía sobrante en las horas valle, para bombear agua a un embalse superior y en las horas punta la aprovechan para dar energía en la red. Disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía. Al caer el agua, almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador. Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor el agua es bombeada al embalse superior para que pueda hacer el ciclo productivo nuevamente. Para ello la central dispone de grupos de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores.

Pueden ser de dos tipos, de turbina y bomba, o de turbina reversible. La alimentación del generador que realiza el bombeo desde aguas abajo, se puede realizar desde otra central hidráulica, térmica o nuclear. No es una solución de alto rendimiento, pero se puede admitir como suficientemente rentable, ya que se compensan las pérdidas de agua o combustible.

La casa de máquinas suele estar al pie de la presa, y en estos tipos de central, el desnivel obtenido es de carácter mediano.

Ilustración 5: Esquema de una central de bombeo



1. Agua embalsada
2. Presa
3. Rejas filtradoras
4. Tubería forzada
5. Conjunto de grupos turbina-alternador
6. Turbina
7. Eje
8. Generador
9. Líneas de transporte de energía eléctrica
10. Transformadores

Fuente: <http://thales.cica.es>

Las turbinas extraen energía de un flujo mientras que las bombas hidráulicas adicionan energía al flujo que la circula. El conjunto de álabes ajustados al eje de la turbina o bomba recibe el nombre de rodete o rotor. Las dos clases más generales de turbinas son las de impulsión o acción y las de reacción. Las primeras operan bajo la acción de uno o varios chorros libres de alta velocidad; cada chorro se acelera hasta obtener su alta velocidad mediante una tobera externa al rodete de la turbina. Si los efectos de rozamiento se consideran insignificantes y la fuerza de la gravedad, la presión del fluido y su velocidad relativa al rodete no cambian durante su paso a través de los álabes de la turbina. De este modo la expansión del fluido desde una presión alta en una turbina de impulso, se lleva a cabo en varias toberas externas a los álabes, y por lo tanto el rodete no se encuentra completamente lleno. En las turbinas de reacción, parte de la expansión del fluido se realiza en el exterior y parte dentro de los álabes móviles. Una vez lograda la aceleración exterior, el flujo se hace pasar al interior del rodete en determinada dirección mediante un conjunto de álabes estacionarios llamados álabes directores. Debido a que dentro de los álabes móviles se tiene una aceleración adicional del fluido con respecto al rotor, tanto la velocidad como la presión de la corriente cambian a través del rodete. La combinación de una fila de álabes estacionarios y una de álabes móviles se denomina etapa. Los rodetes de una turbina de reacción pueden diseñarse para que operen completamente llenos de fluido; como consecuencia, las turbinas de reacción pueden producir mayor potencia para un volumen dado que las turbinas de impulsión.

Las turbinas pueden ser dispositivos muy sencillos, como los molinos de viento o bien constituir sistemas muy complejos con numerosas etapas formadas por álabes cuidadosamente diseñados, como en las turbinas de vapor de gas. Como en este caso estamos hablando de turbinas hidráulicas, el fluido que las haría funcionar sería el agua, pero puede valer cualquier otro fluido.

Existen tres tipos principales de turbinas hidráulicas, y cada una de éstas se utiliza dependiendo de la configuración de la central (altura del salto, potencia, situación geográfica, disponibilidad, uso,

etc.). En términos generales la rueda Pelton conviene para saltos grandes, la turbina Francis para saltos medianos y la turbina de hélice o turbina Kaplan para saltos pequeños.

1) Pelton. Este tipo de turbina se emplea para saltos grandes y presiones elevadas. Las turbinas Pelton aumentan la velocidad del fluido mediante una tobera, produciendo un chorro de agua convenientemente dirigido y regulado que incide sobre las cucharas del rodete que se encuentran uniformemente distribuidas en la periferia de la rueda. Debido a la forma de la cuchara, el agua gira en casi 180° sin choque, cediendo toda su energía cinética, para caer finalmente en la parte inferior y salir de la máquina. La regulación se logra por medio de una aguja colocada dentro de la tobera que deja pasar un chorro de agua que choca con los álabes de la turbina transfiriéndole su energía y haciendo girar la turbina. El agua sale a una muy alta presión.

2) Francis. La turbina Francis es un motor hidráulico de reacción, que se emplea para caudales y alturas medias. El agua procedente de la tubería forzada entra perpendicularmente al eje de la turbina y sale paralela a él. La parte por la que entra el agua en la turbina se denomina cámara de descarga. El agua, después de pasar por el rodete, impulsando a éste y haciéndolo girar, sale por un tubo denominado tubo de aspiración.

Para regular el caudal de agua que entra en el rodete se utilizan unas paletas directrices situadas en forma circular, y cuyo conjunto se denomina distribuidor. Cada una de las paletas directrices se mueve sobre un pivote, de tal forma que llegan a tocarse en la posición de cerrado, en cuyo caso no entra agua en el rodete, y tienen sus caras casi paralelas en la posición de abierto, en cuyo caso el caudal de agua recibido por el rodete es máximo. El conjunto de paletas directrices del distribuidor se acciona por medio de un anillo móvil, al que están unidas todas las paletas directrices, y este anillo móvil, a su vez está accionado por el regulador de velocidad de la turbina.

En las centrales hidráulicas con saltos de pequeña y mediana altura, la turbina Francis se monta con la cámara de descarga abierta. En este tipo de cámara el agua llega libremente hasta la turbina, quedando ésta sumergida en el agua. Para saltos de gran altura no es posible la instalación de cámara abierta, pues ésta quedaría sometida a grandes presiones. En estos casos, se emplean cámaras de descarga cerradas y para saltos aún mayores (300 m y más) cámaras de descarga en espiral; el agua llega a la turbina por la tubería forzada y sale por un tubo difusor o de aspiración.

En este tipo de turbinas, es importante que el agua entre en una dirección y salga en otra a 90° situación que no se presenta en las ruedas Pelton. Las palas o álabes de la rueda Francis son alabeadas.

Un hecho también significativo es que estas turbinas en vez de toberas, tienen una corona distribuidora del agua. Esta corona rodea por completo al rodete. Para lograr que el agua entre radialmente al rodete desde la corona distribuidora existe una cámara espiral o caracol que se encarga de la adecuada dosificación en cada punto de entrada del agua. El rodete tiene los álabes de forma adecuada como para producir los efectos deseados sin remolinos ni pérdidas adicionales de carácter hidrodinámico.

3) Kaplan. En los casos en que el agua sólo circule en dirección axial por los elementos del rodete, tendremos las turbinas de hélice o Kaplan con álabes móviles para adecuarse al estado de la carga. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua de alta presión liberada por una compuerta. Kaplan es una turbina de hélice con álabes ajustables, de forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga. Se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de la potencia. Característica importantísima para un rotor de hélice, pues es una de las deficiencias más notables que se advierten en las turbo máquinas de hélice de alabe fijo, en las cuales la incidencia del agua sobre el borde de ataque se produce bajo ángulos inapropiados, al variar la potencia dando lugar a separación o choques, que reducen fuertemente el rendimiento de la unidad. Estas turbinas aseguran un buen rendimiento aún con bajas velocidades de rotación.

Clasificación por altura de salto:

- Centrales de alta presión. Aquí se incluyen aquellas centrales en las que el salto hidráulico es superior a los 200 metros de altura. Los caudales desalojados son relativamente pequeños, 20 m³/s por máquina. Situadas en zonas de alta montaña, aprovechan el agua de torrentes, por medio de conducciones de gran longitud. Utilizan turbinas Pelton y Francis.
- Centrales de media presión. Aquellas que poseen saltos hidráulicos de entre 20-200 metros aproximadamente. Utilizan caudales de 200m³/s por turbina. En valles de media montaña, dependen de embalses. Las turbinas son Francis y Kaplan, y en ocasiones Pelton para saltos grandes.
- Centrales de baja presión. Sus saltos hidráulicos son inferiores a 20 metros. Cada máquina se alimenta de un caudal que puede superar los 300m³/s. Las turbinas utilizadas son de tipo Francis y especialmente Kaplan.

B. Componentes de una central hidroeléctrica

Los elementos más característicos de una central son la presa, tomas de agua, conductos de agua, aliviaderos, casa de máquinas, estación o subestación eléctrica y turbinas hidroeléctricas.

1. Presa. Las presas son estructuras cuyo objetivo principal es lograr que el agua eleve su nivel para poder ser conducida, o formar un depósito que retenga los excedentes hídricos, para poder compensar luego los períodos de escasez, o para amortiguar las crecidas. Esa condición de producir un embalse, hace que el agua retenida ejerza un empuje de gran entidad sobre la estructura, siendo ésta la mayor sollicitación para la que debe diseñarse la obra.

Desde el punto de vista resistente, el problema fundamental que debe resolverse es la forma en que la presa absorberá la presión que le transmite el agua sin romperse y sin transmitir al terreno natural más carga de la que éste puede soportar.

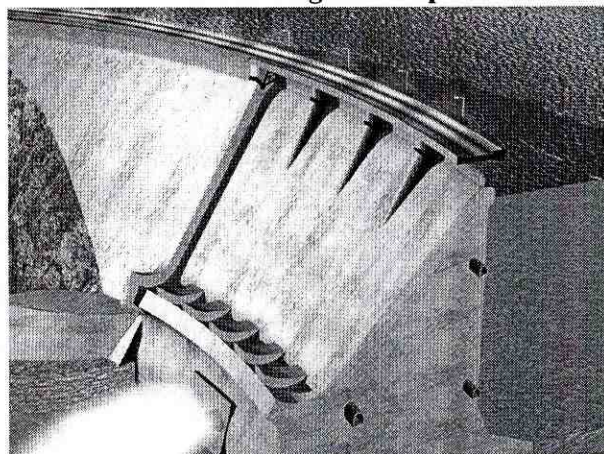
La elección del tipo de presa debe considerar la optimización del proyecto en cuanto a su aspecto estructural, hidráulico y económico. Las consideraciones geológicas y la clase de materiales naturales disponibles en las proximidades son de gran importancia y normalmente limitan el tipo de presa a construir. Así mismo, es importante tomar en cuenta las exigencias del aliviadero.

Una corriente de agua posee una fuerza que aumenta conforme crece el caudal y la pendiente del río, y en el mismo sentido se incrementa su potencial destructivo. Al oponerle un obstáculo para embalsarla, la presa tiene que poder asimilar tal empuje de forma permanente, para cualquier condición de carga, y transferirlo a la tierra. Tanto la forma en que la estructura resiste ese empuje, como la manera en que la transmite a tierra, determinarán el tipo de presa que el proyectista elija. Al mismo tiempo, su fundación o cimentación debe ser capaz de soportar la presión a que la someterá la presa una vez lleno el embalse. Esta cualidad se denominarse como capacidad portante y depende del tipo de suelo o roca que la conforma, es decir de la geología del sitio.

La otra característica básica a considerar en el diseño de una presa, es que el agua penetra en todos los intersticios, provocando presiones indeseadas dentro de la misma estructura. Estas presiones deben ser localizadas para lograr diseñar la presa de manera que pueda resistirlas, o para disipar el exceso de presión que esta condición genera, o para buscar los mecanismos para que los segmentos que puedan ser dañados resulten aislados, protegidos o impermeabilizados.

Otra condición importante es la necesidad de lograr las premisas técnicas mencionadas a un costo que permita la construcción económica de la obra, con esquemas factibles y aceptables para el mercado financiero. Esta búsqueda de alternativas económicas posibles, ha llevado en los últimos años a la incorporación de nuevos diseños y sistemas constructivos para las presas.

Ilustración 6: Fotografía de presa



Fuente: <http://editorial.cda.ulpgc.es/.../presas001.gif>

En cada caso, las condiciones del terreno y las exigencias de los usos del agua (central hidroeléctrica, toma de riego, etc.) y a veces la tecnología y circunstancias económicas del momento dan una serie de condicionantes que llevan a la elección de un tipo determinado de presa. De ahí la conveniencia de disponer de varios tipos, para acoplarse mejor a las diferentes circunstancias.

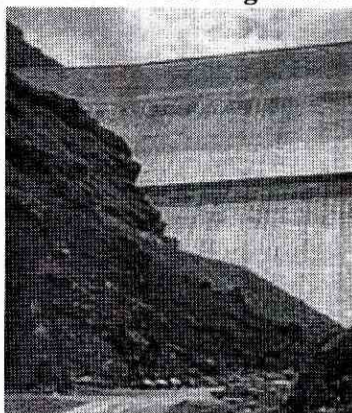
La Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD (International Commission of Large Dams), clasifica las presas según los siguientes tipos:

a. Presas de fábrica (manufactura). En general se refiere a presas construidas con materiales transformados por el hombre. En la actualidad las presas de fábrica son exclusivamente de concreto, en cuya composición interviene cemento, piedras, gravas y arenas, en proporciones variables según el tipo de estructura y las partes de las mismas que se trate. Dentro de las presas de obra de fábrica podemos distinguir las presas de gravedad, con contrafuertes y de muro curvo.

1) Presas de gravedad. Es el tipo de muro más sencillo, se fundamenta en la resistencia que el propio peso de la obra opone al empuje de las aguas. La presión que el agua ejerce sobre la presa, por un lado tiende a hacerla deslizar sobre su fundación y por otro a volcarla hacia aguas abajo. Las presas de gravedad son todas aquellas en las que el peso propio de la presa es el que impide que se produzcan alguna de estas dos situaciones. Su perfil es trapezoidal, y su base de cimentación rectangular. La transferencia del empuje del agua hacia la fundación se realiza a través de la presa, la que será más estable cuanto más pesada sea. Desde este punto de vista, tanto una presa de materiales sueltos como una de concreto, son de gravedad. Sin embargo, suelen llamarse así a las presas macizas de concreto.

El cuerpo de las presas de concreto, se compone de cemento, piedras, gravas y arenas, en proporciones variables según el tipo de estructura y las partes de las mismas que se trate. La particularidad de este material, que le permite adoptar complejas formas una vez fraguado, da la posibilidad de optimizar la forma y, por lo tanto disponer el peso de una manera tal que sea mayor la capacidad de la presa en su conjunto para resistir el empuje.

Ilustración 7: Presa de gravedad



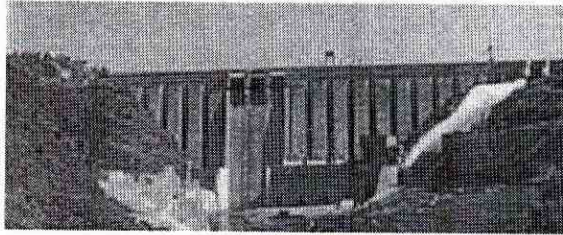
Fuente: <http://mappinginteractivo.com>

2) Presas aligeradas. En las presas aligeradas, para resistir el empuje del agua, se reemplaza la utilización de concreto en grandes masas por un cuerpo resistente más liviano integrado por elementos estructurales tales como columnas, losas y vigas. La presión del agua, distribuida a lo largo de una superficie, se transforma en fuerzas concentradas y se conduce a los apoyos de la presa mediante elementos planos y lineales.

Las presas del tipo aligeradas más conocidas son las de contrafuertes verticales. Los contrafuertes son especies de costillas estructurales perpendiculares al eje de la presa, que se unen hacia aguas arriba con losas de concreto que sostienen el agua, reciben su empuje y lo transmite a los contrafuertes, los que a su vez trasladan los esfuerzos a las cimentaciones de la presa.

En este tipo de presas hay que diferenciar dos elementos estructurales distintos, la membrana o pantalla estanca que detiene las aguas y los contrafuertes que soportan y transmiten a la cimentación los empujes que sufre la pantalla de cerramiento. Para equilibrar el peso que se le quita con el aligeramiento, se le da un talud aguas arriba para disponer del peso adicional del prisma que gravita sobre él. Además, se distribuye la masa de concreto de forma que se logre un mayor momento de inercia en la sección horizontal.

Ilustración 8: Presa aligerada con contrafuertes



Fuente: <http://mappinginteractivo.com>

3) Presas de bóveda. Generalmente denominadas de arco, aunque también pueden denominarse de muro curvo, se fundamentan en su capacidad de transmitir el empuje de las aguas a los estribos, tal como sucede en un arco cualquiera. Las presas en arco transmiten el empuje del agua hacia su fundación y sus apoyos, denominados estribos, aprovechando su forma.

Las presas en arco pueden ser de curvatura horizontal o de doble curvatura conocidas como bóveda o cúpulas. Las presas de arco son sumamente esbeltas adquiriendo formas muy audaces y complejas, las que les permiten ser muy altas y de poco espesor. Para lograr sus complejas formas se construyen con concreto y requieren gran habilidad y experiencia de sus constructores, quienes deben recurrir a sistemas constructivos poco comunes.

Debido a que transfieren en forma muy concentrada la presión del agua al terreno natural, se requiere que éste sea de roca muy sana y resistente, la que debe también ser muy bien tratada antes de asentar en ella la presa.

Dentro de las presas de muro curvo, se distinguen:

- Arco. Presas con curvatura solo horizontal.

- Arco-gravedad. Presas con doble curvatura y resisten al empuje por el peso del muro que transmiten al estribo a través del arco.
- Cúpula. Variedad dentro del tipo bóveda donde el muro no es una bóveda sino una cúpula.

Ilustración 9: Presa de muro curvo



Fuente: <http://mappinginteractivo.com>

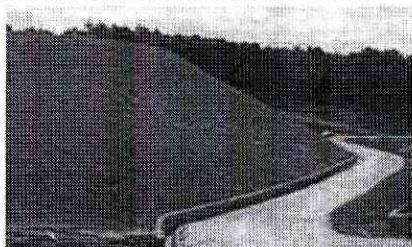
b. Presas de materiales sueltos. Son presas de gravedad en las que materiales provistos por la naturaleza no sufren ningún proceso químico de transformación, siendo tratados y colocados mediante procedimientos de compactación propios de la mecánica de suelos. En su composición intervienen, piedras, gravas, arenas, limos y arcillas.

Cuando todo el material que componen las presas de materiales sueltos tiene las mismas características, se denominan homogéneas, pudiendo tratarse de materiales más o menos impermeables. O bien pueden ser heterogéneas, que son las más comunes, cuando se colocan diferentes materiales zonificados, con núcleo impermeable y materiales más permeables a medida que nos alejamos del centro de la presa. La impermeabilidad puede lograrse también mediante pantallas o diafragmas. Estas variantes pueden presentarse mediante configuraciones que se integren con distintas participaciones de las diversas características mencionadas.

Las presas de materiales sueltos no soportan ser sobrepasadas por una crecida. Por ello es necesario, basándose en los resultados de un estudio hidrológico, efectuar una predicción de la forma en que se deberá operar el embalse formado, para evitar que en toda la vida de la obra sea sobrepasada por ninguna crecida.

1) Tierra. Cuando más del 50% de los materiales son térreos o mezclados con gravas o arenas. Las causas o motivos de su construcción son la capacidad de la moderna maquinaria para tratar grandes masas de tierra, grava o roca y los procesos técnicos con un más perfecto conocimiento de la mecánica de suelos que permite preparar mezclas de tierra adecuada a los fines de estos diques.

Ilustración 10: Presa de tierra



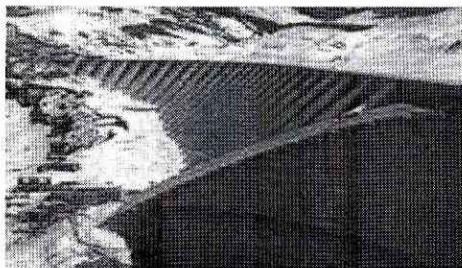
Fuente: <http://mappinginteractivo.com>

2) Escollera o enrocado. Cuando más del 50 % del material está compuesto por piedra, siendo la piedra gruesa el material predominante.

3) Tierra-Escollera. Combinación de las dos anteriores.

4) Presas mixtas. Son aquellas que poseen una combinación de tipos de muros o la clase de material, según las diferentes opciones descritas anteriormente para presas de fábrica y presas de materiales sueltos.

Ilustración 11: Presa mixta



Fuente: <http://mappinginteractivo.com>

c. **Presas especiales.** Podemos considerar como presas especiales aquellas cuyo muro de contención se construye con materiales no mencionados hasta el momento como RCC (Rolled Compact Concrete) que es concreto compactado con rodillo.

2. Tomas de agua. Las tomas de agua son construcciones adecuadas que permiten recoger el líquido para llevarlo hasta las máquinas por medios de canales o tuberías. Las tomas de agua de las que parten varios conductos hacia las tuberías, se hallan en la pared anterior de la presa que entra en contacto con el agua embalsada. Estas tomas además de unas compuertas para regular la cantidad de agua que llega a las turbinas, poseen unas rejillas metálicas que impiden que elementos extraños como troncos, ramas, etc. puedan llegar a los álabes y producir desperfectos.

3. Canal de derivación. El canal de derivación se utiliza para conducir agua desde la presa hasta las turbinas de la central. Generalmente es necesario hacer la entrada a las turbinas con conducción forzada siendo por ello preciso que exista una cámara de presión donde termina el canal y comienza la turbina. Es bastante normal evitar el canal y aplicar directamente las tuberías forzadas a las tomas de agua de las presas.

4. Chimenea de equilibrio. La chimenea de equilibrio consiste en un pozo vertical situado lo más cerca posible de las turbinas. Cuando existe una sobrepresión de agua esta encuentra menos resistencia para penetrar al pozo que a la cámara de presión de las turbinas haciendo que suba el nivel de la chimenea de equilibrio. En el caso de depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajará. Con esto se consigue evitar el golpe de ariete. Actúa de este modo la chimenea de equilibrio como un muelle hidráulico o un condensador eléctrico, es decir, absorbiendo y devolviendo energía.

Debido a las variaciones de carga del alternador o a condiciones imprevistas se utilizan las chimeneas de equilibrio que evitan las sobrepresiones en las tuberías forzadas y álabes de las turbinas. A estas sobrepresiones se les denomina golpe de ariete. Cuando la carga de trabajo de la turbina disminuye bruscamente se produce una sobrepresión positiva, ya que el regulador automático de la turbina cierra la admisión de agua.

Las estructuras forzadas o de presión, suelen ser de acero con refuerzos regulares a lo largo de su longitud o de cemento armado, reforzado con espiras de hierro que deben estar ancladas al terreno mediante soleras adecuadas.

5. Canal de descarga de agua. Las presas tienen unas compuertas que permiten regular el caudal y están protegidas por un enrejado metálico para evitar la entrada de elementos sólidos. Pero las presas, también cumplen la función de regular el caudal de los ríos, por tanto, deben ser capaces de permitir la evacuación del agua sin necesidad de que pase por las turbinas. Para esto utiliza unos rebosadores equipados con compuertas, y a pie de presa se construyen unos elementos amortiguadores de la energía adquirida por el agua cuando cae. En la parte más honda de la presa, están los desagües, que permiten el vaciado de todo el embalse a fin de realizar diferentes tareas.

6. Aliviaderos. Los aliviaderos son elementos vitales de la presa que tienen como misión liberar parte del agua detenida sin que ésta pase por la sala de máquinas. Se encuentran en la pared principal de la presa y pueden ser de fondo o de superficie. La misión de los aliviaderos es la de liberar, si es preciso, grandes cantidades de agua o atender necesidades de riego. Para evitar que el agua pueda producir desperfectos al caer desde gran altura, los aliviaderos se diseñan para que la mayoría del líquido se pierda en una cuenca que se encuentra a pie de presa, llamada de amortiguación.

Para conseguir que el agua salga por los aliviaderos existen grandes compuertas, de acero que se pueden abrir o cerrar a voluntad, según la demanda de la situación.

7. Casa de máquinas. Es la construcción en donde se ubican las máquinas (turbinas, alternadores, etc.) y los elementos de regulación y comando. La presa comprende en su misma estructura a la casa de máquinas. La disposición es compacta y la entrada de agua a la turbina se hace por medio de una cámara construida en la misma presa. Las compuertas de entrada y salida se emplean para poder dejar sin agua la zona de las máquinas en caso de reparación o desmontajes.

8. Estación o subestación eléctrica. La tensión obtenida es igual o inferior a 20kV. Con los transformadores se eleva a la tensión adecuada para su transporte. En el parque de distribución, la central se conecta a la red de transporte. Este transporte se realiza mediante las líneas de alta tensión. La mayoría de las centrales están interconectadas a través de la red de transporte, por tanto, han de estar sincronizadas para tal que sus aportaciones de energía sean compatibles.

IV. AUSCULTACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS

Los proyectos hidroeléctricos son estructuras destinadas a la regulación de los recursos hídricos necesarios para satisfacer las diversas necesidades de la sociedad en la generación de energía, las cuales pueden ir desde las más inexcusables de abastecimiento a poblaciones, hasta otras de contenido económico, como es el caso de los regadíos o las demandas industriales, e incluso de finalidad recreativa.

Estos complejos son de gran importancia para el desarrollo y el nivel de vida de la población, sin embargo es necesario considerar que también existen riesgos relacionados con su construcción y funcionamiento. Los proyectos hidroeléctricos constituyen una amenaza potencial tanto para la naturaleza como para la vida humana, ya que con la presencia de una presa ocurren grandes cambios aguas arriba y aguas abajo de la presa y en la propiedad que sus aguas rodean.

La zona de inundación bajo riesgo en el evento de una ruptura catastrófica puede ser extensa, densamente poblada y de importancia económica considerable. La falla de la presa puede producir grandes daños materiales y provocaría la pérdida de muchas vidas. Además, las fallas de una presa están seguidas por un periodo de incremento progresivo de mala operación estructural dentro de la presa o su cimentación.

Debido a los peligros que pueden derivarse de un mal funcionamiento en estas estructuras, se han implementado normas y se ha incrementado la disponibilidad de instrumentación destinada para la auscultación de proyectos hidroeléctricos. Estos instrumentos son colocados de forma estratégica y tienen como función principal revelar las anomalías o tendencias adversas en el comportamiento y así proporcionar advertencias prontas sobre posibles peligros.

El número de instrumentos es de menor importancia en relación a la selección del equipo apropiado, su instalación correcta en sitios críticos y la interpretación inteligente de la información resultante dentro de un programa de vigilancia global. La efectividad del programa está determinada por muchos factores como los marcos de referencia legal y administrativo en los cuales se establece procedimientos y responsabilidades.

Los sistemas de auscultación permiten conocer el conjunto de acciones que actúan sobre la estructura, ya sean éstas de carácter estructural, hidráulico o medioambiental y la respuesta de las distintas partes frente a dichas acciones, la cual es manifestada en movimientos, filtraciones, presiones, esfuerzos, etc. Se deberá seleccionar el sistema de control necesario para conocer en todo momento el comportamiento de la estructura y del terreno, ante las cargas previstas durante los periodos de construcción y explotación. En todo proyecto hidroeléctrico es recomendable disponer de un sistema de control de desplazamientos que incluya la alineación de la coronación o de una galería alta que abarque toda la longitud de la presa, y la nivelación de los puntos más importantes de la estructura.

El objetivo principal y más importante de la auscultación es obtener la información necesaria para comprobar el comportamiento y detectar cualquier irregularidad relacionada a las condiciones de esfuerzos, presiones, filtraciones, deformaciones, etc. y hacer una valoración continua de la seguridad de la presa durante su construcción y periodo de servicio. De este modo, los datos obtenidos durante los periodos de auscultación se utilizan para comprobar el comportamiento previsto con el diseño propuesto.

Además, la auscultación de proyectos hidroeléctricos permite el ajuste y mejoras en las técnicas de cálculo y diseño. Los proyectos de este tipo requieren de altos factores de seguridad, debido a la complejidad e incertidumbre que existe en cuanto a la determinación de las características y comportamiento de los materiales y la estructura en general. Las hipótesis resultan altamente conservadoras y los diseños poco económicos. De este modo, las observaciones suministradas por los sistemas de auscultación y la valoración de la influencia de los distintos factores sobre el comportamiento estructural, permite el diseño de modelos más precisos, seguros y económicos, mediante mejoras en las técnicas de cálculo, en los ensayos estructurales y en las elecciones de los parámetros del proyecto.

Otro objetivo de la auscultación de proyectos hidroeléctricos es proporcionar información sobre el comienzo o desarrollo de daños o deterioros, para poder tomar medidas correctas y evitar poner en peligro la seguridad de la estructura y de la población.

A. Instrumentación

1. Aplicación y objetivos. El cuidado en la planificación, diseño y correcta instalación de todos los instrumentos incluyendo el más sencillo, es importante para un desempeño satisfactorio. Debe considerarse el alcance y grado de sofisticación individual y del conjunto de instrumentos.

La instrumentación debe ser monitoreada, evaluada y mantenida, y los datos deben ser comparados con las lecturas previas y con los valores de diseño esperados. En 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 o punto en el cual se requiere un examen detallado de las lecturas.

Además, debe asignarse la responsabilidad de las lecturas de instrumentos de rutina, cambios en los datos, calibración, interpretación y evaluación de los resultados y alertas. El modo y la metodología de las lecturas deben ser descritos, ya sea en forma automatizada o manual. También, se deben proveer ubicaciones exactas y detalles de las instalaciones de los instrumentos, completados con las vistas de planos y planos de secciones transversales.

Los instrumentos pueden por conveniencia clasificarse de acuerdo con la función principal de su instalación:

- Control de la construcción. Verificación de los parámetros críticos de diseño con retroalimentación inmediata al diseño y a la construcción.
- Desempeño después de la construcción. Validación del diseño, determinación del patrón de comportamiento inicial o de referencia.
- Funcionamiento y vigilancia del servicio. Confirmación de la capacidad estructural, detección de cambios regresivos en el patrón de comportamiento establecido, investigación de problemas identificados o que se sospechan.
- Investigación y desarrollo. Investigación académica, pruebas y desarrollos de los equipos.

Para propósitos de control de la construcción o de investigación, los valores absolutos de los parámetros específicos y su tendencia observada pueden ser de igual importancia. Esto es menos importante cuando la función principal del conjunto de instrumentos es monitorear el desempeño a largo plazo. Los valores absolutos pueden considerarse de importancia secundaria respecto a la detección de cambios y tendencias en el patrón de comportamiento, cuando se confirme que tales desviaciones no se deben a un cambio observado en el régimen de carga, sino a otras influencias externas. La detección y el análisis del cambio en un patrón de comportamiento previamente establecido como normal es la justificación esencial para todo conjunto de instrumentos instalados para vigilancia.

2. Planeación de la instrumentación. La planeación y la especificación de un conjunto amplio de instrumentos involucran una secuencia lógica de decisiones:

- Definición de los propósitos y objetivos
- Definición de las observaciones apropiadas para el tipo de proyecto considerado.
- Determinación de los sitios y cantidad de puntos de medición para tomar las observaciones deseadas.
- Consideración del periodo de tiempo que se va abarcar (monitoreo a corto o largo plazo).
- Consideración de modos de operación óptimos del sensor con respecto a la rapidez de respuesta deseada, precisión requerida, etc.
- Selección del equipo apropiado para las tareas definidas en los cinco primeros puntos.

Los instrumentos deben abarcar todos los aspectos críticos conocidos de la estructura, pero también deben colocarse en sitios donde se pueda anticipar el comportamiento normal y que sirvan de puntos de control. Cuando es una estructura nueva se debe instrumentar por lo menos en dos secciones, incluida la sección mayor. Es una buena práctica hacer un bosquejo inicial de la disposición ideal y luego eliminar progresivamente las medidas menos esenciales y determinar un plan adecuado, balanceado y que se pueda conseguir. El éxito de la etapa de instalación y puesta en marcha de la instrumentación depende del cuidado de los detalles.

Entre los aspectos que deben considerarse están los procedimientos para la puesta en uso y prueba de los instrumentos, para determinar valores de referencia y para el entrenamiento especial

del personal de monitoreo. En esta etapa se deben considerar con detalle también los procedimientos para el manejo de la información.

3. Adquisición y manejo de la información. La planeación lógica del sistema de adquisición y procesamiento de la información es esencial para que el programa de instrumentación se realice por completo. Si las observaciones son confiables y la información se ha interpretada con rapidez, el valor del programa disminuirá severamente. Los procedimientos de operación deben definirse con cuidado y las responsabilidades individuales del personal identificadas con claridad.

Dentro del plan de auscultación debe indicarse con claridad la frecuencia del monitoreo determinada sobre bases racionales, reflejando los objetivos y los parámetros individuales, lo cual está sujeto a correcciones de acuerdo con la información que se obtenga. La prescripción detallada de la periodicidad es cuestión de sentido común y de criterio de ingeniería.

El exceso de información puede agobiar y hacer confusiones importantes; la información insuficiente traerá más preguntas que la que podrá resolver. Un sistema de excesiva complejidad, ya sea en términos de equipo o de habilidades de operación requeridas, disminuirá su utilidad, por eso se requiere un balance justo y se debe tener cuidado para asegurar que el sistema permanezca sensible y flexible.

B. Parámetros en la auscultación de proyectos hidroeléctrico

Los parámetros más importantes en el monitoreo del comportamiento de las presas son los siguientes:

- Infiltración y fugas (cantidad, naturaleza, localización y fuente).
- Deformación externa (magnitud, tasa, localización).
- Deformación interna (magnitud, tasa, localización).
- Asentamientos (magnitud, tasa, localización).
- Presión de aguas en los poros y empuje (magnitud, variación).
- Esfuerzos internos o presión (magnitud).

En el Cuadro No. 1 se relacionan los parámetros más importantes para la auscultación de proyectos hidroeléctricos y los instrumentos más utilizados en cada caso.

Cuadro 1: Instrumentos utilizados para cada parámetro de monitoreo

Parámetros	Instrumentos
Infiltración	Aforadores con medida eléctrica, óptica o mecánica
Presión de poros	Piezómetros, celdas de presión total
Empuje o subpresiones	Piezómetros, celdas de presión total
Temperatura	Termómetros de mercurio, resistencia o cuerda vibrante
Movimientos sísmicos	Sismógrafos, acelerógrafos

Deformación Externa	Topografía precisa superficial, péndulos, medidores de grietas y juntas
Deformación interna:	Inclinómetros, extensómetros, péndulos
- Movimientos horizontales	Péndulos directos o invertidos, teodolito de precisión, inclinómetros, extensómetro adaptado
- Movimientos verticales	Nivelación, topografía precisa superficial, extensómetros
- Movimientos angulares	Inclinómetros
- Movimientos relativos	Extensómetros, medidores de juntas
Cargas, esfuerzos	Celdas de carga

C. Principios de diseño para la auscultación de proyectos hidroeléctricos

Los instrumentos de monitoreo deben funcionar satisfactoriamente para las condiciones ambientales que se presenten y durante periodos de tiempo por lo general indeterminados. Como base para un buen diseño los instrumentos deben ser simples, consistentes en su funcionamiento, sólidos, confiables, durables en condiciones ambientales y económicamente aceptables (costos de compra, instalación, soporte y monitoreo). En el Cuadro No. 1 se proporciona una guía para la identificación de los parámetros que pueden ser monitoreados con cada tipo de instrumento.

Un principio importante consiste en colocar los elementos de medida sofisticados y vulnerables, como componentes electrónicos y transductores, por encima del nivel del terreno donde sea posible. En estos casos es ventajoso hacer que los elementos por encima del terreno sean de fácil transporte. Otras ventajas están asociadas con el uso de un elemento de medición portátil, consisten en mayor seguridad física y que se evita la construcción de casetas de instrumentación grande y costosa para alojar el equipo de medición fijo.

Las capacidades de los instrumentos tienden a centrarse en suministros para la toma de información automática o semiautomática de los instrumentos, facilidades de almacenamientos y transmisión automática a un sitio central. Las mejoras en la capacidad y la complejidad se reflejan en altos costos y en mayor riesgo de mal funcionamiento o falla de los componentes y por consiguiente del sistema. La instrumentación a un nivel poco sofisticado y básico resultará adecuado para el monitoreo y vigilancia de rutina.

D. Tipos de auscultación

Los tipos de auscultación son los siguientes.

1. **Auscultación hidráulica.** La auscultación hidráulica incluye el monitoreo de:
 - Filtraciones

- Presión intersticial
- Subpresiones.

Las filtraciones se producen a través del material cuando el agua tiene contacto con la presa. En las presas de tierra o escollera, debido al material que constituye la presa, se debe tener una mayor vigilancia. El aforador de filtraciones es, sin duda, el mejor indicador del comportamiento general de la presa, y su importancia reside en el hecho de que la filtración es una magnitud integral y, por tanto, refleja el comportamiento de toda la presa y no solo las situaciones puntuales. El caudal de filtraciones debe medirse a intervalos regulares, analizando el agua de filtración por si hay decoloración o turbiedad o por si se registra un aumento anormal durante las visitas de inspección.

En el interior de la presa se crea una presión intersticial cuya componente vertical produce una fuerza contraria al peso, que resulta ser desestabilizadora. Por esta razón, resulta necesario medir las presiones intersticiales en los materiales y en el cimiento de la presa para conocer si la distribución de presiones intersticiales y de subpresiones está conforme a lo previsto.

El equipo empleado proporciona registros de presiones en determinados puntos de interés según la configuración estructural de la estructura, y estos sistemas de medida pueden variar dependiendo de las necesidades de precisión y de las condiciones del lugar. Los instrumentos utilizados para este tipo de auscultación son los distintos tipos de piezómetros disponibles y las celdas de presión.

Por razones exclusivamente de explotación, en todas las presas se mide continuamente el nivel de embalse. Sin embargo, este valor únicamente proporciona el valor del volumen de agua embalsada para determinar las aplicaciones y usos que pueden generarse de la presa.

2. Auscultación térmica. La medición de temperaturas, tanto del ambiente como del interior de la presa, tiene una gran importancia en el cálculo de esfuerzos en las presas de concreto, ya que este material está es sometido a los esfuerzos inducidos por la temperatura derivada de la expansión o retracción, cuando los parámetros de la presa están expuestos directamente a la luz solar en épocas calurosas o a la presencia del viento muy frío.

Para la medición de temperaturas en el interior de las presas de concreto y para conocer su distribución durante las fases de construcción y explotación, se dejan embebidos termómetros de resistencia fundamentalmente en los bloques de mayor altura y en los dos bloques de los estribos.

Además, es importante tomar en cuenta que una gran variedad de instrumentos de auscultación requieren de factores de corrección debido a las variaciones de temperatura durante los periodos de operación.

3. Auscultación sísmica. En todas las grandes presas deben instalarse dispositivos para medir la actividad sísmica. Los aparatos sísmicos, sismógrafos, se utilizan tanto en las presas de concreto como en las de materiales sueltos para controlar los efectos de las vibraciones naturales o terremotos como las vibraciones provocadas por actividades humanas. Tales vibraciones podrían provocar deformaciones excesivas o una licuefacción en una presa de materiales sueltos o en sus cimientos, lo que supondría una drástica disminución de la seguridad y a un aumento de la filtración. Los terremotos pueden causar también inestabilidad de los estribos o laderas del embalse.

La mayor parte de la instrumentación sísmica consiste principalmente en dispositivos para registrar fuertes sacudidas (acelerógrafos) que miden la aceleración del terreno en dos o más planos. Estos aparatos consisten en una base embebida en una parte de la presa y en un acelerómetro u otros dispositivos de identificación del movimiento que registra la magnitud de la vibración de modo continuo durante un periodo de tiempo dado. Algunos aparatos funcionan de forma continua, mientras que otros requieren una ligera vibración para empezar a funcionar.

Por lo general, se instala un sismógrafo en las proximidades de la base de la presa para registrar el movimiento y la respuesta de la estructura ante estas cargas.

4. Auscultación de deformación.

- Deformación externa
 - o Movimientos horizontales
 - o Movimientos verticales
 - o Movimientos angulares
 - o Movimientos relativos

- Deformación interna
 - o Movimientos horizontales
 - o Movimientos verticales
 - o Movimientos angulares
 - o Movimientos relativos

La medida de los movimientos de traslación se lleva a cabo normalmente utilizando técnicas topográficas. Todos los aparatos usados para este propósito tienen características comunes, y requieren ser altamente sensibles, tener una adecuada instalación de los puntos de medición y una gran precisión al hacer las observaciones.

Las medidas de los movimientos de traslación horizontal requiere generalmente el uso de teodolitos de precisión, péndulos, inclinómetros o por una adaptación del principio del extensómetro vertical. En el muro se disponen los medios de observación instalando puntos o dianas permanentes en la coronación, durante o inmediatamente después de la construcción. También se dispone de referencia en los estribos o en lugares suficientemente alejados de la presa para que no estén afectados por las deformaciones próximas que puedan producir la presa o el embalse. Para la adaptación del extensómetro vertical para el monitoreo de movimientos

horizontales, los tubos se instalan en zanjas dentro del relleno, con estaciones magnéticas o collares instalados a intervalos horizontales apropiados. Un aparato especial motorizado se emplea para recorrer la probeta en toda la extensión del tubo y regresarse, determinando la localización de cada estación a medida que pasa.

La medición de movimientos verticales tales como asentamientos o levantamientos puede llevarse a cabo con una nivelación topográfica o mediante dispositivos especiales colocados verticalmente, como los extensómetros. El asiento o levantamiento total puede determinarse rápidamente mediante observaciones en la presa. Las diferencias de cota que ocurren a lo largo del tiempo pueden determinarse fácilmente. Obviamente es importante determinar la cota inicial de los puntos de medida con gran precisión, de modo que sirva de referencia para comparar con ellas las cotas futuras determinadas en posteriores mediciones.

Los movimientos relativos de una parte del muro o estructura de concreto respecto a otra parte de las mismas o del cimiento, se miden generalmente mediante distintos tipos de aparatos de medida de deformaciones. Tales aparatos son los medidores de juntas, extensómetros y otras clases de aparatos de control de fisuras.

5. Auscultación de esfuerzos. La determinación directa y confiable del estado de esfuerzos en una masa de roca, en el suelo o en el concreto, presenta serias dificultades. Restricciones debidas a los materiales hacen que sea imposible obtener el sensor ideal que mida con precisión, en todos los niveles de esfuerzo, la resistencia deseada. Es necesario ser precavidos con la interpretación de presiones o esfuerzos registrados en el campo. Los instrumentos más utilizados para la auscultación de esfuerzos son las celdas de carga, cuyo funcionamiento se explica más adelante. Estas deben ser colocadas durante la construcción para que queden embebidos dentro del material.

6. Auscultación geodésica. El objetivo de la auscultación geodésica es la determinación de movimientos pequeños en una estructura, a partir de observaciones realizadas desde el exterior.

Es necesario anular esfuerzos externos en la instrumentación, utilizar métodos y técnicas adecuadas, y obtener observaciones lo más exactas posibles, para lograr obtener valores reales en la determinación de movimientos.

El método consiste en medir ángulos, mediante la visualización de dianas, desde puntos fijos de observación, aguas abajo y a suficiente distancia de la presa, para que no puedan ser afectados por movimientos de ésta o de los cimientos. Cuando esto no es posible de manera suficiente, las posiciones de estas estaciones se refieren, a su vez, a puntos más lejanos que puedan considerarse como fijos y poder corregir posibles movimientos en éstas.

Los elementos que participan en un proceso de la auscultación geodésica son:

- La red de pilares de auscultación
- La malla de dianas de puntería
- La red de puntos de seguridad

Después de diseñar los elementos permanentes de la auscultación y dejar preparado el conjunto para los sucesivos monitoreos, se establece la instrumentación a utilizar. Anteriormente, la evaluación de los movimientos se hacía exclusivamente con teodolitos de apreciación próxima a la decima de segundo sexagesimal. En la actualidad también intervienen distanciómetros de gran precisión. Ambas formas de captar la información inicial, necesaria para establecer las deformaciones relativas o absolutas, tienen sus ventajas y desventajas y ambas deben ser consideradas en el momento de establecer un proyecto de auscultación geodésica.

En la red de pilares se han de plasmar todos los parámetros que tendrán influencia en las observaciones. Estos parámetros son: número de pilares, proximidad a las dianas, ángulo de intersección entre visuales e inclinación de visuales. En muchas ocasiones no es sencillo diseñar la red óptima, ya que no es posible construirla por condiciones de la realidad física del territorio. Sin embargo, existe la posibilidad de determinar antes de la construcción, gráficamente o por medios analíticos, la mejor ubicación de los elementos fijos que consolidan el pilar, con el objetivo de obtener el mayor provecho a las observaciones que se realizarán.

La malla de dianas tiene una configuración más simple, pues depende de la propia estructura a auscultar o del espacio susceptible de presentar movimientos en los taludes inestables. En lo posible se tratará de llenar la zona que protagoniza la medición de la forma más coherente posible.

Además de la red de pilares y la malla de dianas, es necesario disponer de una red complementaria de testigos que se ubiquen fuera del área de influencia del movimiento que se desea detectar. Esto se hace con el objetivo de garantizar el punto de inicio de las diversas observaciones que se realizarán desde los pilares, en cada monitoreo. Esta red también debe ser diseñada con criterios lógicos para hacer óptima la captura de los datos necesarios para determinar el posible movimiento de los pilares de auscultación.

En cada estación hay un bloque de concreto dispuesto para colocar el teodolito en un punto perfectamente definido en sus tres coordenadas (x, y, z). Las estaciones deben estar cubiertas y cerradas lateralmente para aislarlas de los efectos de elementos ambientales externos, aunque, por supuesto, la visual ha de hacerse sin interferencias de un cristal en las ventanas u otros.

Estas operaciones son lentas y complicadas, y requieren una elaboración posterior, por lo que se comprende que se hagan con intervalos de meses. Para mayor precisión se suelen hacer estas observaciones durante la noche, para evitar las distorsiones accidentales debidas a la insolación parcial de la presa, la refracción atmosférica y los reflejos.

Desde cada uno de los pilares se hacen observaciones a las referencias (puntos cero), a los puntos de seguridad y a todos los puntos testigo. Se hacen series con las dos referencias de partida, realizándose punterías en círculo directo y punterías en círculo inverso para cada una de las visuales. Posteriormente se calculan los promedios de las series realizadas.

Hay dos metodologías implicadas en el tratamiento de los datos captados:

a. Intersección directa. La determinación de los desplazamientos de las dianas se realiza resolviendo las diferentes intersecciones directas que se crean desde los pilares de auscultación.

b. Intersección inversa. La determinación de los posibles movimientos de los propios pilares se consigue mediante la observación de los puntos de seguridad, que están ubicados fuera del área de influencia del embalse.

V. NORMAS PARA LA AUSCULTACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS EN GUATEMALA

Las presas son estructuras que proporcionan muchos beneficios, al mismo tiempo que representan un alto riesgo por su potencial poder destructivo. Actualmente, La comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) ha implementado las Normas de Seguridad de Presas con el objetivo de prevenir daños a los bienes y a las personas que residen en áreas adyacentes a su ubicación. Además, en los últimos años se han iniciado numerosas campañas con el fin de impulsar el cumplimiento de estas normas, sin embargo la falta de recursos e información ha limitado el avance en la aplicación de las mismas.

De este modo, la elaboración de documentos que recopilen información relacionada a los temas de auscultación de presas contribuirá directamente a alcanzar los objetivos de seguridad planteados por el CNEE, además de lograr sistemas más eficientes y duraderos.

El documento presentado por el CNEE se desglosa en cinco áreas compuestas por las siguientes normas:

NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS RESOLUCION CNEE-29-99 Guatemala, 8 de septiembre de 1999.

Capítulo I: Requerimientos generales

- Objetivos y alcance de las normas
- Responsabilidad de la seguridad de la presa
 - o Artículo 1. Dueño de la presa
 - o Artículo 2. Programa de seguridad de la presa
 - o Artículo 3. Transferencia de la propiedad
 - o Artículo 4. Empresa o profesional individual que efectúe el examen de seguridad
 - o Artículo 5. Entidad Responsable de elaborar y fiscalizar el cumplimiento de las Normas de Seguridad de Presas.
- Clasificación de las presas
- Selección de los criterios de seguridad
 - o Artículo 6. Perturbaciones sísmicas
 - o Artículo 7. Inundaciones
 - o Título V Presa puesta fuera de servicio

Capítulo 2: Inspecciones y exámenes de la seguridad de la presa

- General
 - o Artículo 8. Inspecciones de rutina
 - o Artículo 9. Inspecciones intermedias
 - o Artículo 10. Inspecciones especiales
- Examen de la seguridad de la presa
 - o Artículo 11. General

- Artículo 12. Clasificación de las presas
 - Artículo 13. Inspección del sitio
 - Artículo 14. Diseño y construcción
 - Artículo 15. Operación y prueba
 - Artículo 16. Mantenimiento
 - Artículo 17. Vigilancia y monitoreo del funcionamiento de la presa
 - Artículo 18. Preparación para emergencias
 - Artículo 19. Conformidad con los resultados de exámenes previos de la seguridad de la presa
 - Informe de la seguridad de la presa
 - Incumplimiento de los requerimientos de seguridad de la presa
- Capítulo 3: Operación, mantenimiento y vigilancia
- General
 - Artículo 20. Manual de operación, mantenimiento y vigilancia
 - Artículo 21. Archivo de registro permanente
 - Artículo 22. Cuaderno de trabajo
 - Operación
 - Artículo 23. Información de diseño
 - Artículo 24. Procedimientos de operación ante inundaciones
 - Artículo 25. Procedimientos de operación ante emergencias
 - Artículo 26. Operaciones para tratar desechos
 - Artículo 27. Pronóstico de inundaciones
 - Mantenimiento
 - Vigilancia
 - Artículo 28. Estándares
 - Artículo 29. Inspecciones regulares y especiales
 - Artículo 30. Instrumentación
 - Artículo 31. Pruebas
- Capítulo 4: Preparación para emergencias
- General
 - Plan de preparación para emergencias (PPE)
 - Artículo 32. Desarrollo y contenido de un PPE
 - Artículo 33. Mantenimiento y prueba de un PPE
 - Artículo 34. Capacitación

A continuación se detallan las normas con relación a la auscultación de proyectos hidroeléctricos y utilización de instrumentación geotécnica.

A. Vigilancia

1. Artículo 28. Estándares. El dueño de la presa debe establecer los estándares para cada presa a fin de cubrir las inspecciones, vigilancia de las estructuras que retengan agua y probar las facilidades para descarga. El nivel de vigilancia se debe basar en la clasificación de la Consecuencia de la presa (Sección 1.3).

Los estándares o reglas deben ser provistos por el dueño de la presa para establecer los tipos de inspecciones que serán llevados a cabo, el propósito de cada tipo de inspección, frecuencia de las inspecciones, tipo de ítems a ser inspeccionados, documentación requerida, calificación y capacitación de los inspectores y procedimientos para la corrección de las deficiencias.

2. Artículo 29. Inspecciones regulares y especiales. A fin de obtener una línea base de datos, se debe llevar a cabo una inspección inicial en la nueva presa antes de comenzar el llenado inicial. Se deben realizar inspecciones periódicas para determinar la condición de porciones integrales de las estructuras que retengan agua. Se deben realizar investigaciones apropiadas de todas las deficiencias potenciales reveladas por las inspecciones regulares.

a. Inspecciones de rutina. Deben ser realizadas por el Personal de Operación y Mantenimiento como parte regular de sus actividades para mantenimiento. Tales inspecciones deben ser llevadas a cabo semanal o mensualmente de acuerdo a lo que sea conveniente para el ítem que está siendo inspeccionado. Se pueden seleccionar frecuencias reducidas para adaptarse a las restricciones estacionales.

b. Inspecciones intermedias. Se enfocan como inspecciones más formales, generalmente anuales o semianuales, ejecutadas por los representantes pertinentes del dueño responsable de la vigilancia de la seguridad.

c. Inspecciones especiales. Deben ser llevadas a cabo después de crecidas, vendavales, perturbaciones sísmicas y observaciones inusuales como grietas, sedimentaciones, sumideros, grandes fugas imprevistas y fallas de talud.

d. Exámenes de Seguridad de Presas. Se deben llevar a cabo amplias inspecciones de la seguridad de la presa.

3. Artículo 30. Instrumentación

Las lecturas iniciales de todos los instrumentos se deben realizar y formalizar como una línea base de datos. Las frecuencias de lectura de todos los instrumentos deben ser examinadas frecuentemente durante el embausamiento. Se debe realizar un examen total de las frecuencias de lectura dentro de los dos años de operación normal.

La instrumentación debe ser monitoreada, evaluada y 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. Debe asignarse la responsabilidad de las lecturas de instrumentos de rutina, cambios en los datos, calibración, interpretación y evaluación de los resultados.

El modo y la metodología de las lecturas, automatizada o manual, deben ser descritos. Si es automatizada, el sistema debe ser descrito incluyendo los números de teléfono modernos. Si es manual, deberá haber documentación de la metodología, mantenimiento, calibración y almacenamiento del equipo de lectura de la instrumentación.

Se debe proveer ubicaciones exactas y detalles de las instalaciones de los instrumentos, completados con las vistas de planos y planos de secciones transversales. Las frecuencias de las lecturas deben ser examinadas en cada Examen de la Seguridad de la Presa.

La documentación de la instrumentación debe ser cubierta en un informe separado por instrumento, con referencia a éste en el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMV).

4. Artículo 31. Pruebas. Todos los equipos de operación y facilidades necesarias para pasar el caudal de crecida de diseño deben ser inspeccionados y probados anualmente para asegurar que ellos funcionarán como sea requerido. Para presas donde una falla potencial en la tubería de carga resulte en consecuencias Alta o Muy Alta, el equipo de control de caudal de carga debe pasar anualmente una prueba de balance de la presión antes de la temporada de inundaciones. Las compuertas del aliviadero deben tener pruebas de operación anual para asegurar su correcta operación. El requerimiento para una prueba anual puede ser satisfecho si el equipo es operado sobre una base más frecuente como parte de la operación normal de la facilidad. Se debe documentar la condición del equipo y su operación.

Todos los requerimientos de prueba deben ser especificados en el manual OMV e incorporados con las listas de comprobación de la inspección. Las instrucciones y procedimientos deben proveer descripciones de las pruebas de integridad y operacional para todos los componentes mecánicos y eléctricos del equipo de control de caudal de agua para asegurar sus condiciones totales de operación.

VI. INSTRUMENTACIÓN

Como se menciona anteriormente, los resultados obtenidos de los distintos instrumentos geotécnicos proporcionarán grandes beneficios para la seguridad de cualquier estructura, mediante la obtención e interpretación de parámetros relacionados con el comportamiento estructural de un determinado proyecto. La exactitud y precisión son de gran importancia y la cantidad de modelos y tipos de instrumentos disponibles son altamente variados. Por lo que se requiere de una previa evaluación de las características, ventajas y desventajas de cada tipo de instrumento disponible.

Los métodos de auscultación dependerán de los riesgos potenciales asociados al tipo y características de la estructura. Las características de la estructura de mayor importancia son:

- Altura y tipo de presa.
- Alcance y magnitud de daño potencial a las personas y estructuras ubicadas en zonas de inundación.
- Volumen de embalse
- Condiciones sísmicas del sitio.
- Zonas de debilidad para las cimentaciones

Los factores ambientales que deberán considerarse para la seleccionar del tipo de instrumento y el sensor a utilizar, son los siguientes:

- Margen de variación de la longitud a medir.
- La amplitud de la oscilación de la temperatura en el punto de instalación.
- Condiciones de humedad.

Dependiendo de los requerimientos de auscultación de cada proyecto y de las condiciones del sitio, se seleccionan los instrumentos a utilizar según los siguientes criterios:

- Precisión y exactitud en las medidas.
- Periodo de vida del instrumento.
- Facilidad en la toma de lecturas e interpretación de resultados.

A. Extensómetros

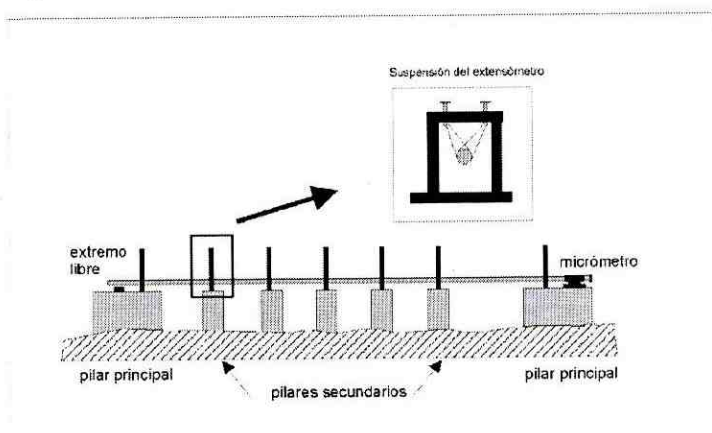
Un extensómetro es un instrumento muy simple que puede alcanzar grandes sensibilidades, y resulta de gran importancia para numerosas aplicaciones para la medición directa de las deformaciones en masas de suelo o en otras estructuras. Las dimensiones de los extensómetros van desde unos pocos milímetros, utilizados para la medición de deformaciones en materiales o para el control de grietas, hasta varias decenas de metros en aplicaciones de geofísica básica y geodinámica.

Estos instrumentos pueden ser instalados de forma vertical, horizontal o en cualquier dirección. Así también, en función de la sensibilidad que se desea alcanzar se puede utilizar uno u otro tipo de

sensor. En cada caso es necesario ensayar cual puede ser la mejor solución debido a la amplia variedad de instrumentos disponibles y las ventajas y desventajas que ofrece cada uno de ellos.

Existen varios tipos de extensómetros que podemos clasificar en tres grupos diferentes: de fibra flexible, de barra y de cinta. Para medir deformaciones muy pequeñas en grandes extensiones hay que acudir a un extensómetro de tipo rígido o de barra.

Ilustración 12: Esquema de un extensómetro horizontal. Detalle del sistema de suspensión



Fuente: <http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/download/Instrumentacion/>

Los extensómetros normalmente se instalan sin revestimiento en perforaciones, pero en terraplenes resulta necesario debido a los posibles problemas de corrosión o deterioro que puede presentar el equipo. La corrosión en los instrumentos debido a la humedad, es uno de los principales factores que perjudican su adecuado funcionamiento, tanto en instalaciones en el interior de túneles como en instalaciones en el exterior.

En todos los casos en que el extensómetro se instale en el exterior, deberá aislarse térmicamente y protegerse de los efectos del intemperismo. Además, es necesario verificar que la protección no altere el desempeño del instrumento, y que éste pueda deformarse con el terreno y además ser lo suficientemente resistente para resistir los esfuerzos desarrollados dentro del suelo. Dependiendo de las características del instrumento, se deberá colocar especial protección a los sensores. También se deberá considerar la protección contra gases, en caso de existir. Para cualquier condición, resulta más conveniente encerrar todo el conjunto dentro de una caja hermética con las salidas necesarias en cada caso.

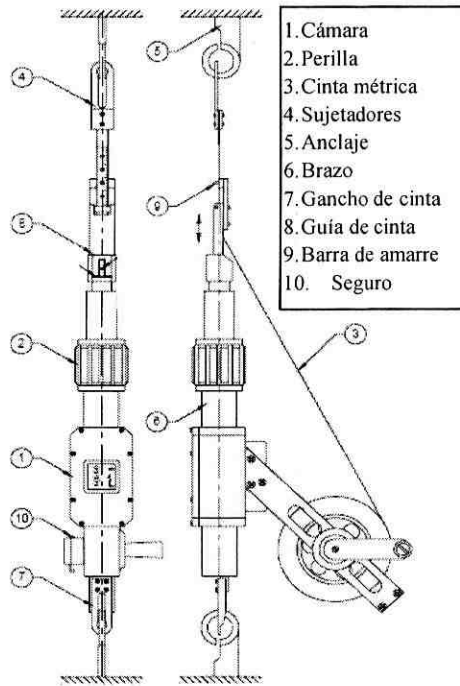
Así mismo, se tiene la influencia de los gradientes de temperatura en los sistemas de lectura de este tipo de instrumentos. La falta de estabilidad de temperatura en las rocas o suelo puede alterar los resultados. Los efectos de temperatura pueden disminuirse con la utilización de un mayor número de extensómetros y la aplicación de factores de corrección, determinados a partir de ensayos preliminares. El lugar más idóneo para la instalación de un extensómetro es en el interior de un túnel con más de 100m de cobertura rocosa donde las variaciones de temperatura se vuelven más suaves y tienen una menor influencia sobre los instrumentos. Esto no siempre es posible, pero

existen extensómetros de pequeñas dimensiones con sistemas de lectura automática que pueden ser enterrados dentro de la masa de interés. Este tipo se le conoce como extensómetros de pozo o "borehole" y es uno de los tipos de extensómetros de barra más utilizados en la actualidad.

Los tipos de extensómetros más utilizados son utilizados son los siguientes:

1. Extensómetro de cinta. El extensómetro de cinta manual está diseñado para medir pequeños cambios de distancia en las paredes o techos opuestos de las excavaciones, túneles u operaciones mineras. El uso principal incluye el monitoreo de deformaciones en minería y en obras civiles, y el monitoreo de deformaciones por deslizamientos de tierra. En el caso de los extensómetros de cinta manual la lectura se proporciona a través de relojes indicadores; y para los extensómetros de cinta digital, las lecturas se obtienen electrónicamente.

Ilustración 13: Esquema de un extensómetro horizontal de cinta



Fuente: www.ampere.com.mx/detallelinea.php?IdMarca=60

Este instrumento permite una fácil y precisa medición de cambios en la distancia entre dos puntos diferentes en cualquier dirección, para lo cual se deberá contar con un diseño liviano y resistente al mismo tiempo.

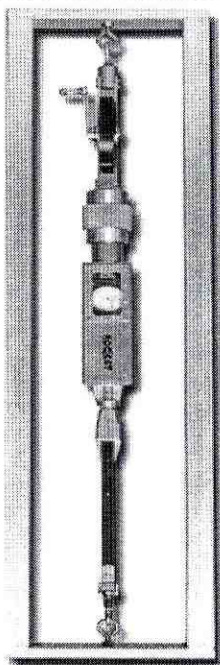
Dentro de las aplicaciones típicas de este tipo de extensómetro se encuentran la detección de hundimientos del techo de minas o túneles, obstrucción de túneles, deformaciones en excavaciones, desplazamientos en terraplenes inestables u otras estructuras.

El extensómetro de cinta consiste básicamente en una cinta de acero perforada, colocada en un carrete que se encuentra unido al cuerpo del instrumento. Este incorpora un mecanismo de tensado para la cinta y un sistema de medición de distancias que por lo regular es mediante un micrómetro o dial. Este equipo posee dos ganchos, uno en el extremo móvil de la cinta y otro en la estructura del carrete. El tensionado de la cinta es realizado con una carga predeterminada, mediante la rotación del carrete, hasta lograr que las líneas de referencia se encuentren alineadas lo más posible.

Para una medición adecuada, el extensómetro es estirado dentro de dos puntos de referencia que consisten en dos tuercas de acero inoxidable, colocadas en sus anclajes respectivos. Puede ser utilizado un equipo de calibración para chequear regularmente la estabilidad del instrumento y para determinar si es necesario efectuar alguna corrección por temperatura.

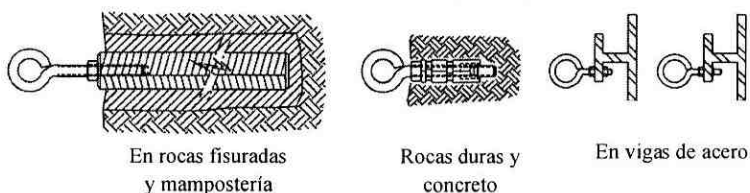
Para poder obtener lecturas precisas, es necesario contar con un anclaje adecuado en los puntos de referencia. El tipo de anclaje se seleccionara de acuerdo a las condiciones del sitio en el que se realizará la medición, y éstos podrán ser con barras de refuerzo, anclados, con pernos o soldados. Las barras de refuerzo se utilizan en rocas y mampostería, los anclajes en rocas duras y en concreto, y los pernos y soldaduras en barras de acero.

Ilustración 14: Extensómetro de cinta



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Ilustración 15: Método de instalación para puntos de referencia



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Para tomar una lectura, el gancho en el extremo móvil del instrumento es colocado en el primer punto de referencia. Moviéndose en dirección al otro punto de referencia, se desenrolla la cinta hasta que pueda alcanzarse el segundo punto de referencia con el otro gancho. Lo suelto de la cinta será removido enrollando el carrete y luego colocando la barra de seguro, localizada en el frente del extensómetro, en el agujero más cercano. Luego, el carrete es rotado para alcanzar la tensión predeterminada, correspondiente a un preciso alineamiento de los dos puntos de referencia. Las lecturas son hechas con la ayuda de un micrómetro o un dial. La misma medición es repetida varias veces para obtener un valor promedio. El equipo de calibración puede ser utilizado antes de comenzar la serie de mediciones para verificar que el instrumento no haya sido dañado y para establecer una base de corrección debido a las variaciones de temperatura en el lugar en el que se realizarán las pruebas.

2. Extensómetro de barra. El extensómetro de barra se usa para medir desplazamiento y deformaciones axiales (compresión y tracción) a lo largo de una perforación. Sus usos principales incluyen monitorear deformaciones para el control de operación de la construcción (represas, cimentaciones, muros de contención, excavaciones subterráneas) y para el monitoreo de deformaciones de deslizamientos de tierra activos o potencialmente activos.

Se encuentran disponibles extensómetros simples o extensómetros múltiples, en diferentes longitudes. Los extensómetros de posición múltiple (multipunto) se diseñan para medir el desplazamiento axial de puntos determinados a lo largo del eje. Todos los extensómetros consisten de un cabezal de medición, un punto o barra de anclaje, barras de medición y una cabeza ajustable de tope para la medición. El conjunto completo va dentro de un tubo protector que lo resguarda de cualquier daño durante la instalación y las mediciones subsecuentes. Se encuentran disponibles también anclajes especiales tanto para terrenos suaves como para macizos rocosos fracturados. En uno de los extremos se fija firmemente a la roca o masa, y en el extremo libre se sitúa un captador de desplazamiento que mide la distancia entre una armadura fija a la roca y el extremo del tubo. Si el extensómetro es muy largo hay que incluir periódicamente un conjunto de soportes y suspensiones. Se pueden efectuar lecturas manuales con el dial micrométrico o grabar los datos en sistemas electrónicos de almacenamiento cuando el instrumento viene adaptado con transductores electrónicos de desplazamiento. En este último caso, se puede implementar un sistema integrado de grabación de datos en forma automática.

Ilustración 16: Extensómetro de barra



Fuente: www.ampere.com.mx/detallelinea.php?IdMarca=60

Dentro de los extensómetros de barra más utilizados encontramos los siguientes:

a. **Extensómetro de posición múltiple.** Este instrumento está diseñado para el monitoreo de deslizamientos, hinchamientos y deformaciones en masas de roca en excavaciones tales como túneles de autopista o ferrocarril, pasillos en instalaciones hidráulicas, plantas y cuartos de máquina subterráneos, minas y bodegas subterráneas. Así también se aplica al monitoreo de la estabilidad de estructuras de cimentación y masas de roca como precipicios, muros anclados, minas a cielo abierto, presas y muros de retención.

Este extensómetro está formado por dos componentes independientes constituidos por un ensamblaje exterior fundido a las paredes de la perforación y una varilla de medición. El ensamblaje exterior incluye de 1 a 9 sensores de desplazamiento y un tubo de extensión para unir los sensores y definir su espaciado inicial. La varilla de medición, fabricada de fibra de vidrio y protegida con polietileno, proporciona la longitud de referencia y posee los núcleos inductivos. Esta varilla es anclada a la parte superior o inferior de la perforación dependiendo de las condiciones de la exploración.

En el momento de la instalación, los núcleos inductivos son posicionados en el centro de los sensores, donde se anticipa que ocurrirá el desplazamiento. Cualquier deformación subsecuente en las masas de la cimentación, causará desplazamientos del sensor exterior en relación a los núcleos inductivos internos. La posición relativa de los sensores en los núcleos será medida con una unidad de lectura portátil o un sistema de registro de datos. Este principio de medición utilizado por este tipo de instrumentos no requiere de conexiones mecánicas entre núcleo y sensor, ni tampoco requiere circuitos electrónicos en la perforación.

Los datos son utilizados para medir los desplazamientos absolutos entre cada núcleo y el anclaje, y deformaciones relativas de cada intervalo sucesivo entre los centros de los sensores.

Ilustración 17: Extensómetro de posición múltiple



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

b. **Extensómetro recuperable de puntos múltiples.** Este instrumento es uno de los desarrollos más importantes en cuanto a los extensómetros utilizados en pozos para el monitoreo de estructuras de roca y concreto. Sus características de diseño en los anclajes mecánicos permiten una

completa recuperación del sistema. Este instrumento, por lo general, posee una alta exactitud y es adaptable a una gran variedad de condiciones ambientales, que permiten su utilización en una gran variedad de situaciones encontradas en proyectos de ingeniería civil.

Dentro de las aplicaciones más novedosas se tienen el monitoreo de bóvedas subterráneas para y la evaluación de grietas internas en presas de concreto. Así también se han utilizado más tradicionalmente en el monitoreo de la estabilidad de taludes de roca y en la medición de desplazamiento de roca alrededor de túneles y pozos.

Este instrumento está compuesto por cuatro componentes principales: anclaje mecánico, módulo de medición, tubería de extensión y centralizadores. Una instalación estará formada por un número de módulos de medición, colocados en serie dentro del pozo, cada uno colocado a una longitud específica a lo largo del tubo de extensión. La medición desplazamientos es realizada en puntos distribuidos a lo largo del pozo.

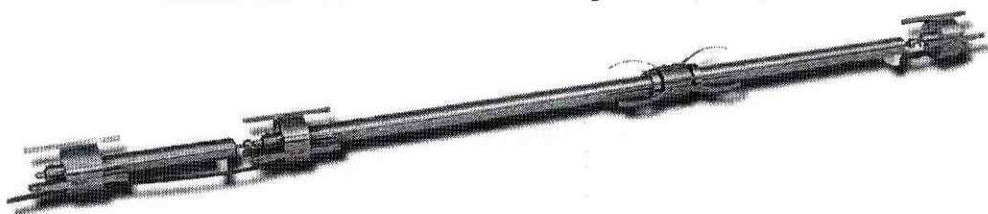
El diseño del anclaje mecánico de estos instrumentos permite una completa recuperación del sistema. El anclaje consiste en un tubo cilíndrico con tres bases de contacto a una separación angular de 120° . Utilizando las herramientas de instalación, el anclaje es ajustado hasta lograr que las bases tengan contacto con las paredes del pozo. La capacidad del anclaje es bastante alta y las bases de contacto están diseñadas para ajustarse a pequeñas deformaciones dentro del pozo mientras se ejercen fuerzas sobre éste.

El módulo de medición consiste en una cápsula resistenten al agua, en la cual es colocado un sensor de desplazamiento. En cada punto, el eje móvil del módulo de medición se encuentra en contacto con el anclaje inferior. La tubería de extensión está formada por tubos individuales que unen los dos anclajes mecánicos en cada sección monitoreada. El material del tubo de extensión puede ser aluminio o acero inoxidable.

El centralizador consiste en un cilindro metálico hueco, en cual se colocan varias aspas metálicas. Un anillo interno de teflón minimiza la fricción entre el centralizador y la tubería de extensión. Los centralizadores son colocados a intervalos regulares a lo largo del tubo de extensión para prevenir el pandeo.

Estos instrumentos pueden ser fácilmente adaptados a perforaciones de distintos diámetros. El procedimiento de instalación para este tipo de instrumento es simple y fácil debido a su diseño modular. También pueden ser fundidos con mortero dentro de la perforación, y en suelos inestables de características pobres, la instalación puede realizarse con la utilización de tubos de plástico previamente fundidos en la perforación.

Ilustración 18: Extensómetro recuperable para pozos



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

c. Extensómetro de punto individual. El extensómetro de barra de punto individual provee una opción de bajo costo para la medición de deformaciones en los alrededores de excavaciones subterráneas. El extensómetro consiste en dos anclajes expandibles que son atornillados a la masa de roca. Una varilla conectada al anclaje más profundo es proyectada, mediante un eje, al anclaje superficial. La inclinación de esta varilla es medida mediante un dial micrométrico, así como su posición en relación al anclaje profundo. Cualquier movimiento de la roca entre los anclajes será medido de esta manera.

Este extensómetro es adecuado únicamente para el monitoreo de grietas individuales. Sin embargo, la utilización de varios extensómetros de distintas longitudes en puntos separados, puede permitir la determinación de planos de falla. Así también puede identificar y diferenciar los movimientos ocasionados por asentamientos internos o por agrietamiento superficial. Estos resultados pueden obtenerse con modelos que posean un tercer anclaje o utilizando los componentes requeridos para extender los extensómetros estándar de punto individual.

En los casos en que la cabeza del instrumento no puede ser alcanzada para la lectura manual, se recomienda un modelo que incluya un sistema de lectura automática.

d. Extensómetro para rellenos. Este instrumento está diseñado para el monitoreo de desplazamientos entre dos puntos dentro de cualquier tipo de relleno artificial. La longitud del extensómetro es variable y es generalmente de 3m, la cual puede incrementarse con piezas de extensión de 2m hasta una longitud total de 30m.

El extensómetro de relleno es usualmente instalado horizontalmente en trincheras. Sin embargo, en algunas aplicaciones es instalado verticalmente para la medición de asentamientos en puntos de contacto con la cimentación. Para el monitoreo del movimiento lateral en terraplenes, varios extensómetros de relleno son colocados en serie. El ensamblaje en línea permite medir el gradiente de deformación en toda la longitud del perfil.

Un extensómetro de este tipo, está compuesto por un contenedor protector de PVC con dos bases, una varilla interna de acero inoxidable y cuatro cables conductores que unen los sensores a la estación de lectura. La varilla interna se encuentra unida a las dos bases en los extremos y posee un sensor de desplazamiento conectado a su extremo exterior.

Este instrumento proporciona altos rangos de medición con alta resolución y mediciones continuas y precisas de desplazamientos y deformaciones axiales. Los materiales de fabricación deberán ser resistentes a golpes y vibraciones causadas por explosiones o sismos.

Las lecturas son tomadas manualmente con una unidad portable de lectura. Se cuentan factores de corrección para la traducción de lecturas en valores de desplazamiento.

Ilustración 19: Extensómetro para rellenos



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

e. Extensómetro en roca. En excavaciones subterráneas se producen continuos cambios en los esfuerzos en las rocas circundantes, con inmediatos traslados a deformaciones de las excavaciones. El monitoreo de estas excavaciones, particularmente cuando se efectúan en rocas con comportamientos dependientes del tiempo, proporcionan información esencial para la evaluación de la estabilidad global del suelo. El objetivo de los extensómetros de barra es medir la convergencia o divergencia, es decir las variaciones de las distancias en función del tiempo, entre dos puntos de referencia situados sobre el contorno de cualquier excavación subterránea, siendo estas mediciones importantes para el control de deformaciones en estudios relacionados al comportamiento del macizo rocoso y al diseño de excavaciones.

Este tipo de instrumentación es relativamente económica, resulta de fácil y rápida instalación, además permiten el seguimiento de mediciones en rangos cercanos a los proporcionados con otros sistemas. Se requiere que sea un instrumento resistente, no inflamables y con sistemas automáticos de lectura, ya que frecuentemente son utilizados para el monitoreo en localidades condiciones subterráneas peligrosas y en algunas ocasiones en presencia de gases.

Este instrumento consiste en dos tubos telescópicos que se mantienen unidos mediante un anillo, a modo de prevenir que el sistema colapse bajo su propio peso. Dentro del tubo se encuentra un potenciómetro para una mayor exactitud en las mediciones. El cable eléctrico se encuentra en la base del instrumento, el cual con una protección adecuada puede ser utilizado en ambientes severos por largos periodos de tiempo. El plato base y los tornillos de ajuste son utilizados para ajustar y tensionar el instrumento entre el piso y el techo de la excavación. Si se desea pueden incorporarse celdas de anclaje adentro de la excavación.

Para lograr una mejor interpretación de la información obtenida y obtener datos más precisos, se proporciona una hoja de calibración con cada instrumento.

Ilustración 20: Extensómetro para roca



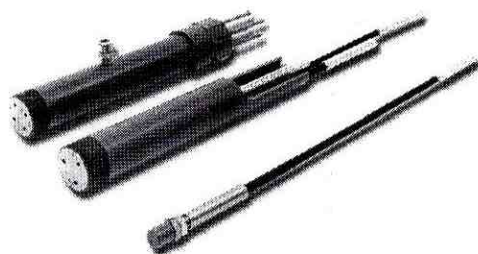
Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

3. Extensómetro de fibra flexible. El extensómetro de fibra flexible se utiliza para obtener mediciones precisas de desplazamientos longitudinales en sondeos de masas de roca o concreto. Sus aplicaciones típicas de monitoreo incluyen deformaciones alrededor de túneles, minas y otras excavaciones subterráneas, asentamiento de estructuras, estabilidad de taludes naturales o artificiales, deformaciones en presas y terraplenes, desplazamiento de estructuras. Este instrumento está compuesto por un grupo de hasta seis varillas de fibra de vidrio, individualmente envueltas en tubos protectores y adheridas a un anclaje. La cabeza de referencia se encuentra anclada de manera externa a las terminaciones del tubo. Cualquier movimiento del anclaje en relación a la cabeza, cambia la distancia entre la cabeza y el extremo libre de la varilla.

Existen varios modelos de este tipo de extensómetro que varían en cuanto al número de puntos de medición (1 a 6), y el tipo de lectura a realizarse, manual o electrónica. Con los mecanismos adecuados podrán efectuarse mediciones tanto mecánicas como electrónicas. Para las lecturas electrónicas, existen cables sensores de vibración para el monitoreo automático de desplazamientos de anclajes y sistemas de adquisición de información para un monitoreo continuo. Estos se encuentran herméticamente sellados contra humedad o intrusión de agua. En el caso de contar con un sistema de lectura manual, las cabezas terminan con tapas removibles para dichas lecturas mediante un calibrador o dial micrométrico de profundidad. Las cabezas son fundidas a las paredes de la perforación mediante un collar previamente instalado y estabilizado mediante algún sistema.

Los anclajes de estos extensómetros pueden ser de acero estriado para fundir in situ, láminas de acero con mecanismos automáticos de liberación o anclajes hidráulicos. El diseño de estos sistemas permite encontrarlos listos para instalación o de manera continua para ser ensamblado in situ.

Ilustración 21: Extensómetro de fibra flexible para pozos



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Ilustración 22: Extensómetro flexible para pozos



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

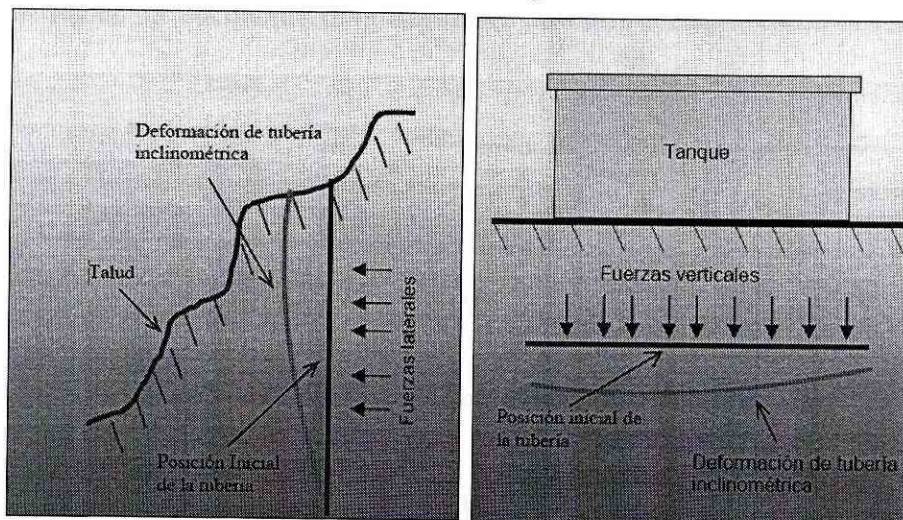
B. Inclinómetro

El inclinómetro consiste en un instrumento que permite determinar los desplazamientos laterales y su dirección en taludes y laderas naturales a diferentes profundidades, así como asentamientos de los materiales de soporte de estructuras civiles, como terraplenes, edificaciones, presas y otros. Estos desplazamientos, son de gran utilidad para evaluar el grado de estabilidad de la estructura o laderas monitoreadas.

Los inclinómetros pueden proporcionar información confiable y segura por años si se les proporciona una instalación adecuada, mantenimiento y si se usan procedimientos de monitoreo apropiados. La única limitante es el requerimiento de algún grado importante de instrucción del personal que realiza las lecturas de los equipos.

Los monitoreos inclinométricos son basados en las deformaciones que pueden sufrir los materiales ante las cargas laterales o gravitacionales, las cuales son determinadas por medio de observaciones en el comportamiento deformacional de tuberías inclinométricas que son introducidas en los estratos de suelo o roca.

Ilustración 23: Esquema de medición de desplazamientos de los inclinómetros

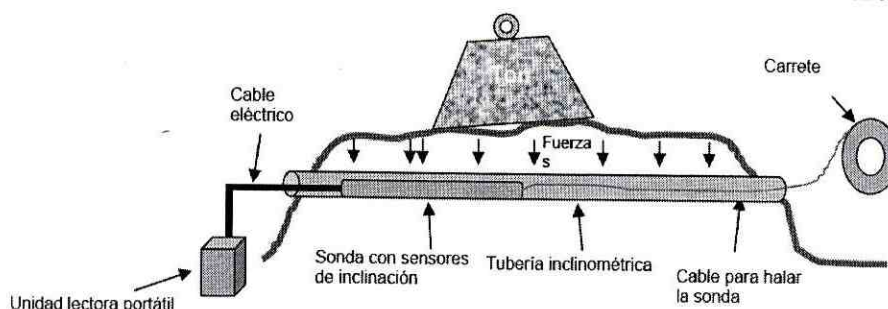


Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

La medición de los desplazamientos de la tubería inclinométrica puede ser realizada de manera periódica o continua, según el tipo de inclinómetro utilizado, portátil o fijo respectivamente. La medición se realiza con respecto a una línea vertical u horizontal según la posición en que haya sido colocado. Luego, mediante operaciones trigonométricas pueden determinarse los desplazamientos horizontales o verticales en relación a dichos puntos de referencia.

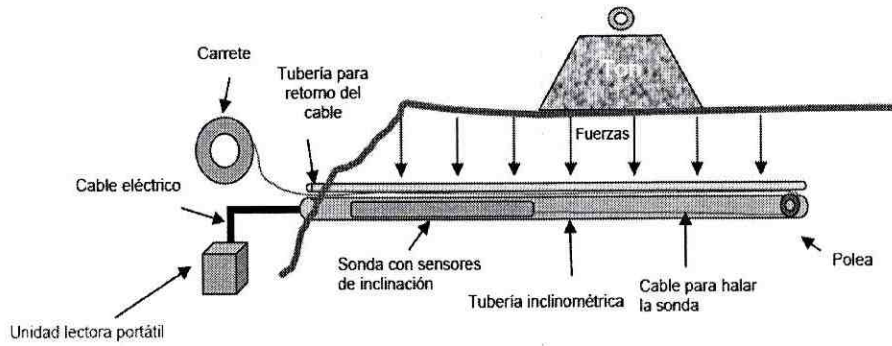
Para la medición de la inclinación de la tubería y transferencia de información, los inclinómetros cuentan con diversos dispositivos, tales como sensores electrónicos de inclinación o servo-acelerómetros, cables eléctricos, una unidad de almacenamiento de información y programas de apoyo. Los sensores electrónicos se encargan de medir la inclinación de la tubería, respecto al eje vertical u horizontal que ha sido establecido. Luego, los cables transfieren la información mediante impulsos eléctricos desde los sensores a una unidad lectora o de almacenamiento de datos. Finalmente, los programas de apoyo sirven para transferir información a computadoras personales y para realizar presentaciones diversas de los resultados.

Ilustración 24: Inclinómetro horizontal con tubería accesible en ambos extremos



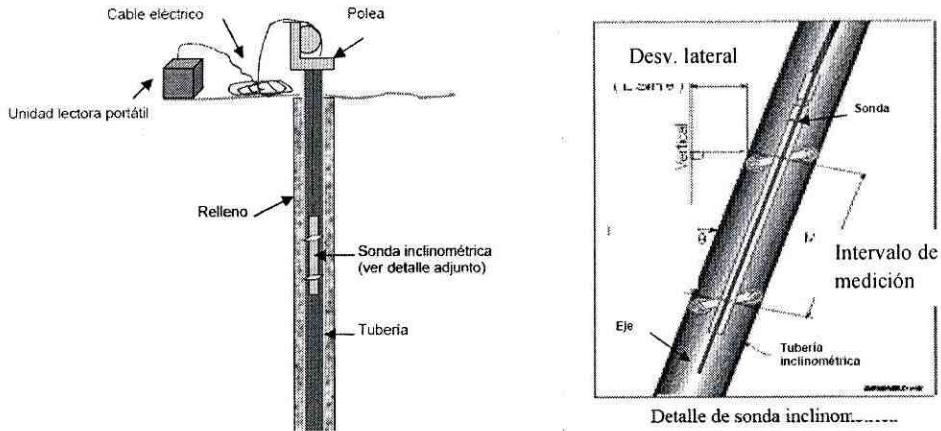
Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Ilustración 25: Inclímetro horizontal con tubería accesible en un extremo

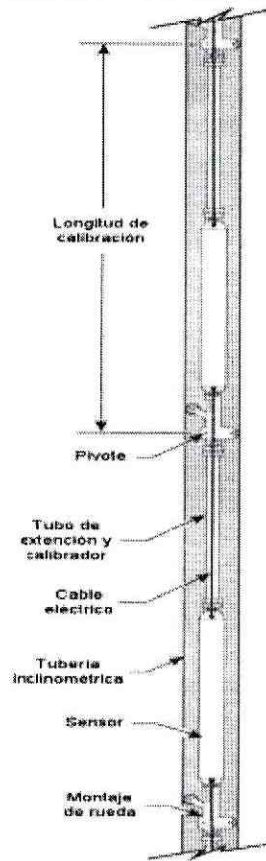


Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

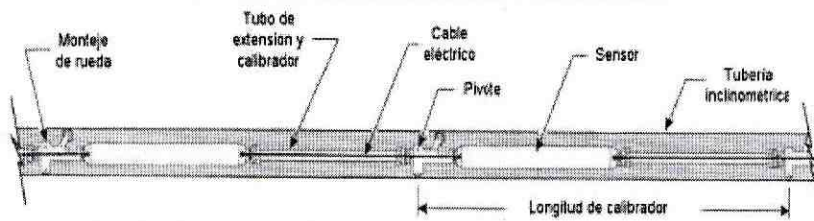
Ilustración 26: Inclímetro vertical



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Ilustración 27: Inclinómetro vertical

Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Ilustración 28: Inclinómetro horizontal

Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Los inclinómetros pueden ser portátiles o fijos, dependiendo de las necesidades del proyecto y de los requerimientos en la continuidad de los ensayos. Los inclinómetros portátiles se utilizan en casos en que los riesgos involucrados son menores, y cuando es factible realizar los ensayos de forma periódica (diario, semanal, mensual, etc.).

Los inclinómetros de posición fija son recomendados para estructuras o laderas que involucran un alto riesgo, y resulta necesario contar con un monitoreo automático y continuo, mediante la

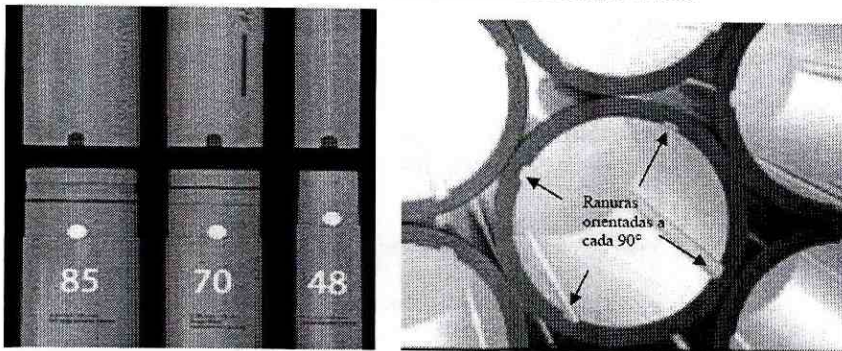
instalación permanente de inclinómetros dentro de tuberías de protección. Estos instrumentos son equipos compactos utilizados para medir cambios progresivos en el ángulo de inclinación de un conjunto de lugares localizados a cierta distancia dentro del revestimiento de una perforación. La medición se realiza mediante sensores inclinométricos que son colocados en las zonas donde se sospecha que ocurrirá movimiento. Los inclinómetros de posición fija tienen la ventaja, sobre los inclinómetros convencionales, de poder ser instalados en lugares que pueden llegar a ser inaccesibles o riesgosos para el personal, ya que los resultados son transferidos a centrales de procesamientos de información de manera automática. Por otro lado, tienen las limitantes de solamente poderse medir los puntos seleccionados a lo largo del perfil de la excavación, además de un costo elevado de adquisición e instalación.

Ambas clases de inclinómetros, portátiles o fijos, pueden ser instalados de forma horizontal o vertical dependiendo del tipo de obra y de las condiciones del lugar a ser monitoreado.

Los equipos para monitoreo inclinométrico están conformados por tuberías inclinométricas y diversos dispositivos para la medición y procesamiento de información. En el caso de los inclinómetros portátiles, dichos dispositivos consisten en una sonda inclinométrica, una unidad lectora portátil, una polea o freno, un cable eléctrico y un software de apoyo.

Las tuberías inclinométricas pueden ser fabricadas de plástico, aleaciones de aluminio o fibra de vidrio, dependiendo del entorno en que serán instaladas y de su facilidad de manipulación. Las altas temperaturas pueden dañar las tuberías de plástico, alto o bajo contenido de PH pueden dañar las tuberías de aluminio y las fibras de vidrio pueden astillarse o romperse al ser manipuladas bruscamente. Las tuberías son fabricadas generalmente en diámetros de 85, 70 y 48 milímetros, y en piezas de 1.5 o 3.0 metros de largo. Las tuberías de mayor diámetro son las más recomendables para monitoreos prolongados ya que resisten grandes deformaciones, debido a su mayor durabilidad. Sin embargo, usualmente el diámetro de la perforación es el que determina el diámetro de la tubería a instalar. Para la unión de estas piezas es necesario el uso de acoples especiales, recomendados por el fabricante. Las tuberías inclinométricas contienen en su interior cuatro ranuras en todo su largo, orientadas a cada 90°, las cuales son utilizadas como guía para las ruedas de la sonda inclinométrica que es introducida al momento de realizar las mediciones.

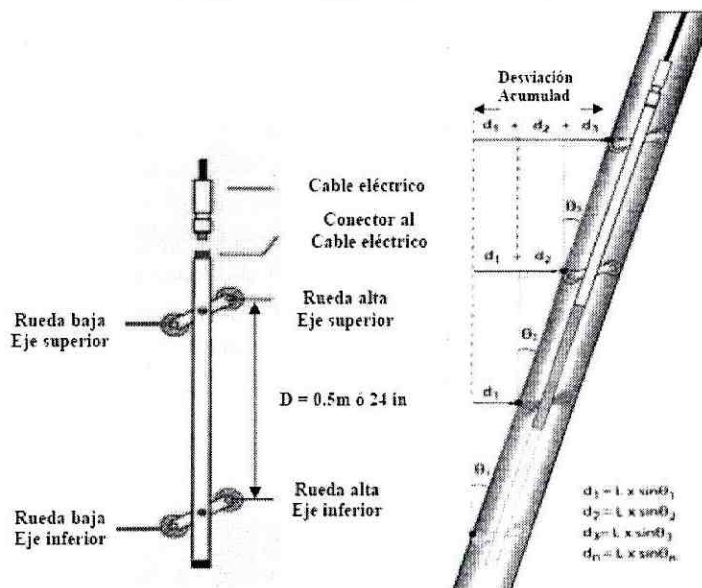
Ilustración 29: Tuberías inclinométricas. a) Diámetro de fabricación de la tubería. b) Vista de las ranuras de las tuberías inclinométricas



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Para la adquisición de datos de la tubería existen dos tipos de sondas inclinométricas, las uniaxiales y las biaxiales. Ambas constan de sensores de inclinación o servo-acelerómetros, que consisten en dispositivos electro-mecánicos formados básicamente por un péndulo simple colocado dentro del campo electromagnético de una bobina que genera fuerzas de inercia sobre éste. Cuando el péndulo cambia de su posición original, dichas fuerzas son transformadas en inclinaciones y transferidas a la unidad lectora mediante impulsos eléctricos. Las sondas uniaxiales contienen un servo-acelerómetro que registra las inclinaciones en la dirección del plano de las ruedas que le sirven de guía; y las sondas biaxiales contienen dos sensores orientados 90° uno del otro, con el cual en una misma dirección se realizan lecturas rápidas ortogonales, proporcionando un análisis más completo de una forma más eficiente y rápida. Con respecto a los ejes de las ruedas de dichas sondas, éstos se encuentran a 0.5 metros de separación en el caso de sondas diseñadas para unidades métricas, y a 24 pulgadas, para las diseñadas en unidades inglesas. Generalmente estas distancias de separación representan el intervalo de profundidad al cual se deben tomar las lecturas al realizar los sondeos, no obstante estos intervalos de toma de datos podrían variar según el criterio del investigador.

Ilustración 30: Sonda inclinométrica. a) Esquema de sonda inclinométrica. b) Inspección de tubería con la sonda inclinométrica



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Ilustración 31: Sonda inclinométrica



Fuente: <http://www.slopeindicator.com>

También, es importante mencionar que la rueda de alta del eje superior es la que indica la dirección en que se efectuará la medición. Estos equipos tienen un rango de medición de $\pm 53^\circ$ respecto a la vertical, una precisión de $\pm 6\text{mm}$ por cada 25m de medición y un rango de temperaturas de operación de -20 a 50°C .

La unidad lectora es el dispositivo que registra las lecturas que proporciona la sonda en el momento de la adquisición de datos en campo, y también nos permite la comunicación con una computadora para poder almacenar y analizar las lecturas obtenidas. Los programas de apoyo se encargan de transferir la información del colector de datos a la computadora y de facilitar la presentación de los resultados.

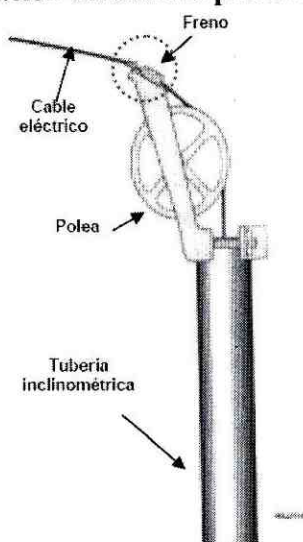
Ilustración 32: Unidad lectora portátil



Fuente: <http://www.slopeindicator.com>

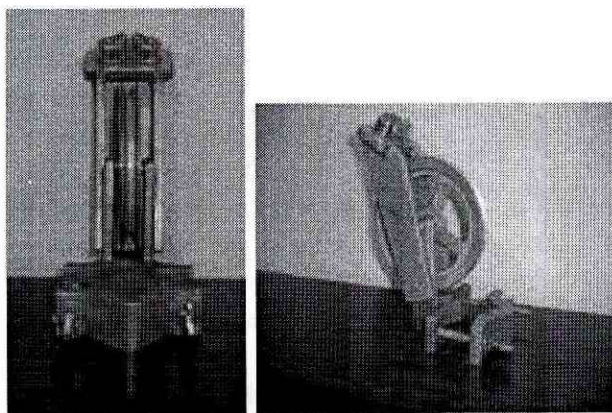
Los sistemas de polea-freno son dispositivos mecánicos que sirven para un mejor manejo del cable eléctrico en el momento de la toma de datos, ya que la polea nos permite centrar el cable en la tubería y las quijadas o freno nos proporcionan una manera de referenciar la profundidad de cada uno de los puntos registrados en la unidad lectora y a la vez estabilizar la sonda.

Ilustración 33: Esquema de colocación del sistema polea-freno en la tubería inclinométrica



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

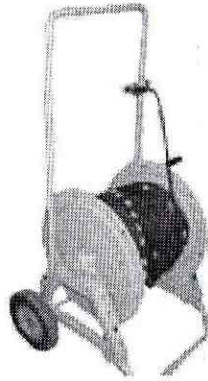
Ilustración 34: Esquema del sistema polea-freno



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

El cable eléctrico cumple tres funciones, las cuales consisten en proveer de energía eléctrica a los servo-acelerómetros de la sonda inclinométrica, transferir la información hasta la unidad lectora portátil y establecer un control de los intervalos de lecturas, mediante los puntos de control colocados en toda su longitud y el uso de las quijadas o freno. Las distancias entre cada marca depende del sistema de unidades del equipo utilizado.

Ilustración 35: Carrete para el almacenaje del cable eléctrico



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

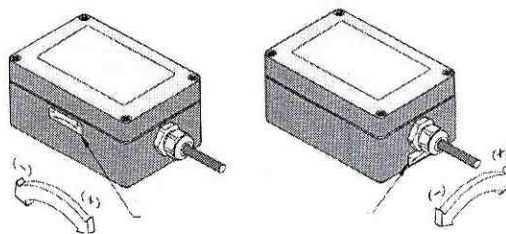
A continuación se describen los tipos de inclinómetros más utilizados.

1. Inclinómetro uniaxial. Este instrumento es ideal para monitoreos con cargas estructurales, monitoreos de movimientos de paredes o cimentaciones, supervisión de estructuras naturales o estructurales (puentes, taludes, presas), y el control y posicionamiento de maquinaria.

El inclinómetro uniaxial representa una opción para una amplia variedad de aplicaciones que requieren de un monitoreo subterráneo o que poseen condiciones no accesibles. Las características de diseño lo hacen un sistema fijo de medición.

El sensor de inclinación, con referencia gravitacional, es un elemento interno debidamente protegido para garantizar una alta precisión y estabilidad a largo plazo. Debido a las medidas de protección que se proporcionan con estos equipos, este instrumento puede ser utilizado en ambientes externos con condiciones de humedad y climas extremos.

Ilustración 36: Inclinómetro uniaxial



Configuración longitudinal

Configuración transversal

Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

2. Inclinómetro biaxial. Este instrumento se utiliza para el monitoreo de la magnitud y a tasa de deformación lateral o movimientos en el interior de estructuras o en masas de roca o suelo. Las aplicaciones más comunes incluyen el monitoreo de deformaciones y deflexiones en puentes, torres, chimeneas, presas, cimentaciones, edificios antiguos, determinación de la estabilidad de terraplenes naturales o artificiales, control de asentamientos, hinchamientos y subsidencias, y delimitación de zonas de derrumbes.

Sus componentes principales son un sensor biaxial, servo-acelerómetro, sonda inclinométrica, cables y sistema de lectura.

El sensor de estos instrumentos cuenta con un sistema flexible y un detector electrónico que proporcionan alta sensibilidad, un amplio rango dinámico, alta resistencia y estabilidad a largo plazo ante condiciones de temperatura. La suspensión flexible permite que sensor no sea susceptible al deterioro progresivo en presencia de vibraciones.

El servo-acelerómetro está equipado para realizar los ajustes térmicos y mantener una respuesta constante en los amplios rangos de temperatura bajo los que se opera. Así también una gran variedad de voltajes podrán ser utilizados sin alterar el desempeño del equipo. Es importante considerar las condiciones de humedad bajo las cuales se estará operando el equipo, y en caso sea necesario, las tuberías inclinométricas deberán estar fabricadas de acero inoxidable y selladas para evitar infiltraciones de agua dentro de los dispositivos.

El cable se usa para transmitir las señales eléctricas entre los sensores y el sistema de lectura para elevar y bajar la tubería inclinométrica y para establecer la profundidad de ésta. El cable esta marcado generalmente a intervalos de dos pies o medio metro. El estiramiento del cable se minimiza con núcleos de acero inoxidable y un conector resistente al agua es colocado al final del tubo inclinométrico.

Ilustración 37: Inclinómetro biaxial

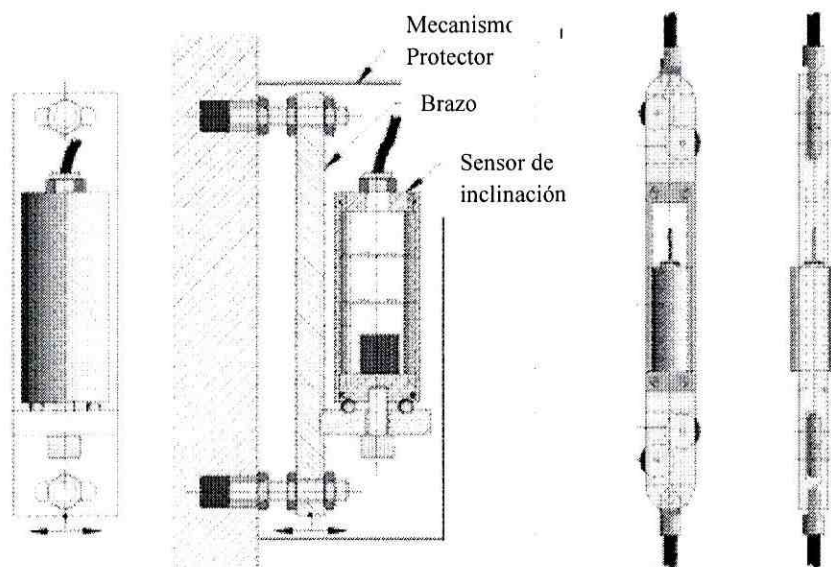


Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Como opción para lograr lecturas más precisas, puede incorporarse un micro-acelerómetro diferencial. En este caso, el sensor de inclinación está constituido por dos acelerómetros de alta capacidad sensitiva. Los sensores son colocados de forma opuesta uno del otro, a modo de cancelar errores y aumentar la exactitud durante la medición. El sensor es protegido con un cilindro de acero inoxidable que permite la entrada de los cables mediante agujeros sellados para soportar presiones de hasta 1000kPa (100m de agua).

Estos instrumentos proporcionan alta sensibilidad y estabilidad termal ante diferentes condiciones ambientales, ya que las diferencias en las lecturas individuales de los dos sensores ubicados en posiciones opuestas, cancela cualquier error producido por cambios de temperatura u otras desviaciones que podrían desarrollarse a largo plazo. Además, por lo general, incorporan un sistema que reduce la rotación y proporciona alta estabilidad. Las lecturas de estos instrumentos pueden ser tomadas de forma manual o electrónica.

Ilustración 38: Inclinómetro con servo-acelerómetros diferencial



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

3. Inclinómetro biaxial resistente. Éste es un instrumento de sensor biaxial que resulta bastante económico para el monitoreo de inclinaciones en excavaciones. El inclinómetro incluye un sensor de inclinación con referencia gravitacional. La alta resolución y estabilidad a largo plazo se garantizan mediante la utilización de protectores estándares.

La aplicación más importante de este tipo de instrumentos es la medición de deflexiones a grandes profundidades. Múltiples unidades pueden ser conectadas mediante fibras flexibles, a modo de abarcar mayores distancias y facilitar los procedimientos de instalación. Pueden utilizarse para monitoreos de tipo continuo, o en conjunto con inclinómetros convencionales para una mayor

exactitud en los resultados. En general, este instrumento representa una solución de bajo costo para el monitoreo de terraplenes y taludes.

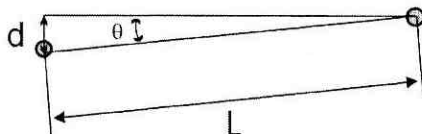
Ilustración 39: Inclinómetro biaxial resistente



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

4. Inclinómetro de barra. Este tipo de instrumento detecta rotación entre dos puntos establecidos. El sensor de inclinación es colocado en una viga rígida anclada en cada extremo a la estructura que está siendo medida, y normalmente posee una longitud de uno a tres metros. Los cambios en la inclinación del instrumento pueden ser fácilmente convertidos a desplazamientos, ya que las medidas de rotación ocurren sobre una longitud definida.

Ilustración 40: Medida de desplazamientos en inclinómetros de barra



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Los sensores pueden ser conectados en sus extremos para determinar los desplazamientos acumulados a lo largo del perfil horizontal y vertical.

Ilustración 41: Desplazamientos acumulados a lo largo de perfiles horizontales



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

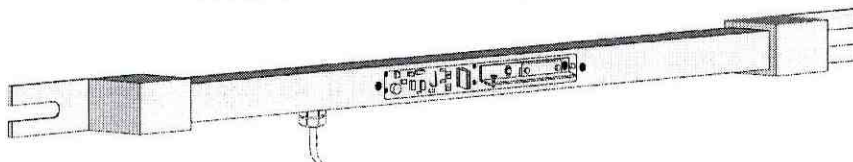
Las aplicaciones más comunes son el monitoreo del comportamiento del material en excavaciones o túneles de estructuras existentes, el monitoreo de movimientos en las paredes de túneles, el comportamiento de puentes y otras estructuras bajo carga y la detección de rotaciones en presas, muros de contención, pilotes y tuberías.

El instrumento consiste en un sensor de inclinación que puede ser uniaxial o biaxial y que es colocado sobre una barra rígida de aluminio orientada de forma horizontal o vertical. Las barras son sujetadas a la estructura mediante dos anclajes colocados en cada uno de los extremos.

Con estos instrumentos es posible generar el perfil de movimiento a lo largo de grandes distancias de cientos de metros sin ningún problema y con gran exactitud. Los sensores pueden ser leídos mediante sistemas manuales o electrónicos.

En barras horizontales, el sensor de inclinación es colocado en el interior de la barra. Por el contrario, en barras verticales, el sensor es colocado en la parte exterior de la barra y por lo tanto es necesario que éste se encuentre dentro de un protector resistente al agua. Estos instrumentos poseen sistemas de ajuste que permite posicionar la inclinación del sensor en cero y ajustar el rango sin la necesidad de tener que calibrar el instrumento de forma manual.

Ilustración 42: Inclinómetro de barra



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

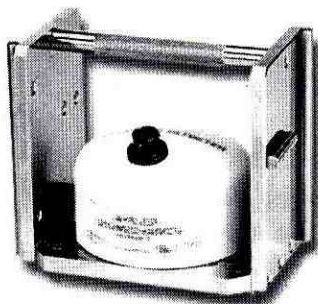
5. Inclinómetro portátil. Este instrumento es recomendable para una amplia variedad de aplicaciones en las que no se requiere un monitoreo continuo. Los nuevos modelos disponibles permiten que la exactitud en los resultados sea relativamente alta en comparación a equipos más completos. Además, algunos sistemas de lectura permiten la elaboración de gráficos continuos de movimientos en función del tiempo, en base a las lecturas obtenidas de forma periódica. Sin embargo, un sistema continuo siempre proporcionará lecturas mucho más cercanas al comportamiento real de las estructuras monitoreadas, que aquellos con mediciones periódicas.

Sus aplicaciones más comunes incluyen el monitoreo a largo plazo en estructuras y cimentaciones, la medición mecánicas en la respuesta ante cargas aplicadas, y la obtención de niveles en superficies de suelo o roca.

Las lecturas se realizan de forma periódicas en puntos establecidos previamente y donde han sido ancladas o fundidas, horizontal o verticalmente, las placas sensoriales. Este instrumento posee un sistema en su base que se adapta fácilmente a las placas instaladas, permitiendo una ubicación exacta de los puntos seleccionados.

El sistema de este equipo transforma los datos obtenidos de la posición angular en medidas de deformación de las estructuras. La posición angular medida es referenciada al vector de gravedad, el cual posee una dirección vertical constante. Las características en este sistema, eliminan los gastos requeridos en monitoreos continuos debido a los requerimientos de tiempo y medidas de protección necesarias. Además, el poco contacto con los ambientes externos garantiza un largo periodo de vida para en estos instrumentos.

Ilustración 43: Inclinómetro portátil



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

C. Piezómetros

Los piezómetros son comúnmente utilizados para medir la presión del agua que puede ser inducida durante la construcción o vida útil de la presa. Se utilizan también para medir el nivel de la superficie freática, causado por la infiltración del agua a través de porciones relativamente permeables de terraplenes y cimentaciones. Estas mediciones pueden llegar a ser críticas debido a posibles condiciones de inestabilidad o infiltración inducida, tales como elevaciones excesivas de la presión hidrostática. Los piezómetros pueden ser diseñados para operar como sistemas abiertos o cerrados, cuya selección depende de las condiciones del sitio y de la confiabilidad requerida. Las celdas de presión total se utilizan para monitorear la presión estática total que actúa sobre una superficie plana y ayudan a definir la magnitud de esfuerzos principales en terraplenes y contra conducciones, estructuras de operación, cimentaciones y paredes de retención.

1. Equipos de sistema abierto. Dentro de los aparatos de sistema abierto el piezómetro Casagrande es el más utilizado. Este sistema se utiliza para la medición de la presión de poro del agua en terraplenes, cimentaciones o en sitios seleccionados en los contrafuertes de las presas. Dentro de las aplicaciones más comunes se encuentran el monitoreo de presas, autopistas y aeropuertos, el estudio de la estabilidad de taludes, el control de drenajes, estudios ambientales, y toma de muestras de agua. Pueden instalarse dentro de una perforación o en terraplenes durante su construcción.

Los piezómetros Casagrande tienden a ser de operación simple y con un costo de instalación relativamente bajo. Estos instrumentos no requieren de mantenimiento y tampoco existen problemas por corrosión, ya que la punta piezométrica es generalmente fabricada de materiales inertes,

durables y que no se deterioran ni corroen ante las diferentes condiciones ambientales a las que podrán estar expuestos. Sin embargo, los filtros porosos pueden llegar a obstruirse por la repetida entrada y salida del agua, además de que estos instrumentos pueden ser dañados durante la construcción o por cualquier interferencia con éstos.

Los piezómetros Casagrande están compuestos por un filtro plástico de aproximadamente 3.8cm, con una porosidad uniforme que generalmente es de 60 micrones, un coeficiente de entrada de aire bastante bajo y alta resistencia de impacto. El filtro puede ser instalado ya sea con tubos rígidos o flexibles, de manera individual o doble.

Debe tomarse en cuenta que las instalaciones en materiales limosos están sujetas a problemas resultantes de la tendencia de partículas finas a penetrar dentro del relleno de arena, reduciendo de esta manera la sensibilidad del piezómetro. Mediante ensayos simples puede determinarse la sensibilidad de la punta y la permeabilidad del suelo alrededor de ésta.

El tubo del piezómetro debe extenderse lo más verticalmente posible para lograr lecturas precisas, excluyendo de esta manera el monitoreo de áreas por debajo del embalse. Si se cuenta con las condiciones adecuadas, no sólo se obtienen largos periodos de utilidad, sino además los resultados obtenidos son altamente confiables.

Para la toma de lecturas, este instrumento posee un indicador de agua unido a un tubo de aproximadamente 1.1cm. El sistema de medición incluye una cinta graduada a cada metro que se encuentra sobre una bobina que indica cuando el tubo entra en contacto con el agua. Para piezómetros manuales, las lecturas deberán ser tomadas mediante un manómetro de la manera más cuidadosa y rápida posible. Cuando el manómetro sea retirado, será necesario sellar la cabeza del tubo a modo de evitar infiltraciones futuras. En estos casos, los tiempos de lectura son relativamente largos, sin embargo cualquier tipo de lectura puede utilizarse con poco o ningún cálculo matemático.

Ilustración 44: Piezómetro Casagrande



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

2. Equipos de sistema cerrado

a. **Piezómetros hidráulicos.** Se utilizan para medir la presión de poros o presión total en terraplenes y en las cimentaciones de presas. Este tipo de instrumentos consiste en uno o dos tubos saturados con fluido y una punta porosa. En estos casos, el segundo tubo sirve como un medio de limpieza para remover gas o sedimentos acumulados. El piezómetro es conectado a un manómetro en el punto de observación.

Las principales ventajas de los piezómetros hidráulicos son que el tiempo de lectura es menor al requerido con piezómetros de tubo abierto, poseen una cierta capacidad para medir presiones negativas, y son menos propensos a daños durante la construcción.

Sin embargo, presentan algunos inconvenientes que deberán ser considerados antes de su operación. Las desventajas más significativas son las recurrentes fallas en su funcionamiento, la necesidad de una caseta terminal en la base, demoras en los trabajos de construcción durante su instalación y técnicas de mantenimiento que requieren entrenamiento especializado. Además, la disponibilidad de estos equipos es limitada, los costos de fabricación son elevados y requieren de un mantenimiento constante.

3. Piezómetros neumáticos. Los piezómetros neumáticos también pueden ser instalados para el monitoreo de proyectos hidroeléctricos y se utilizan principalmente donde las operaciones de construcción podrían dañar otro tipo de instrumentación. Estos instrumentos están diseñados para medir la presión de fluidos en masas de suelo y roca, y en la interface o en la vecindad de estructuras enterradas en el suelo. Los piezómetros neumáticos son utilizados para el monitoreo de la presión de poro o presión total en terraplenes o rellenos, presas, cimentaciones (infiltraciones, hinchamientos), taludes naturales o artificiales, muros de contención, pilotes, recubrimiento de túneles y alcantarillas. Su uso minimiza la interferencia con los equipos de construcción.

Algunas de las ventajas de estos instrumentos son el fácil mantenimiento, un tiempo de instalación relativamente corto y el nivel del sitio donde se hacen las lecturas es independiente del nivel de la punta del piezómetro. El único mantenimiento requerido es la ocasional calibración de los manómetros de los equipos de lectura y la remoción de agua de las mangueras cuando se necesite.

La limitación que presentan estos instrumentos es la falta de confiabilidad en cuanto a su desempeño y durabilidad, debida a la falta de documentación por su invención relativamente reciente. Además, requiere de cantidad significativa de tiempo y de personal capacitado para la realización de lecturas. Es necesario realizar la calibración del instrumento antes de instalarse y ya adheridos a las mangueras con la longitud a utilizar, para determinar su desviación desde cero.

Los piezómetros neumáticos están constituidos por un filtro en su base y dos tubos neumáticos para conectar la entrada de gas de nitrógeno y las líneas de retorno. Comprende un diafragma flexible y delgado en el que es aplicada la presión del fluido. Durante la toma de lectura, esta presión es balanceada con la aplicación externa de gas de nitrógeno. Las lecturas son obtenidas

cuando la presión de gas es igual a la presión de poro actuando en el lado contrario del diafragma. El cambio de volumen asociado al presurizado del diafragma es extremadamente pequeño y consecuentemente el tiempo de respuesta es bajo, incluso en suelos de baja permeabilidad y arcillas. El diseño y materiales utilizados en su construcción permiten que pueda ser utilizado para el monitoreo a corto o largo plazo donde se requiere resistencia, estabilidad y confiabilidad. Un filtro colocado en la línea de entrada del gas, previene la entrada de partículas externas dentro del piezómetro.

Ilustración 45: Piezómetro neumático



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

4. Piezómetros de cuerda vibrante. Se instalan en cimentaciones y terraplenes para el monitoreo de la presión de poro del agua. Es utilizado para el monitoreo de estructuras de ingeniería como estructuras hidráulicas, cimentaciones, muros de contención, presas, terraplenes, excavaciones, túneles, depósitos de desechos y otros. Como los otros sistemas de piezómetros cerrados, se emplean en terraplenes donde la utilización de piezómetros de tubo abierto no es la adecuada, debido a posibles daños en el equipo si se interfiriera con éste durante la construcción. En algunas instalaciones se han utilizado para verificar la precisión de instrumentos adyacentes. También se utilizan donde se requiere el monitoreo de presiones de poro negativas.

Estos piezómetros son de fácil lectura y mantenimiento, y requieren de un tiempo relativamente corto para obtener las lecturas. Sin embargo, se requiere de personal capacitado para calibrar y ensayar el equipo antes de ser instalado. El único mantenimiento requerido es el cuidadoso mantenimiento de las unidades de lectura y las baterías.

En aplicaciones donde son importantes pequeños cambios de la presión de poros, es necesario hacer correcciones por cambios en la presión barométrica y por temperatura, aunque esto no es generalmente un problema en la mayoría de las presas.

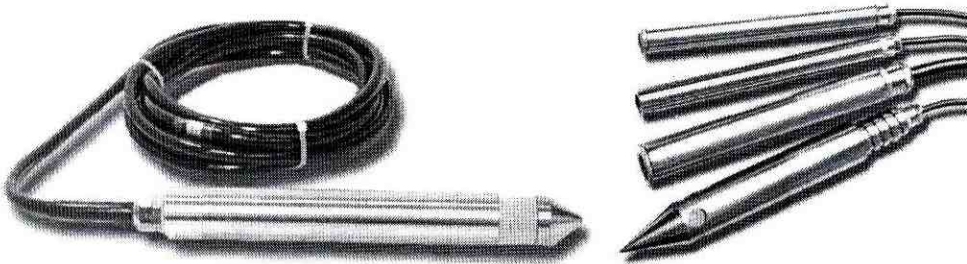
El piezómetro de cuerda vibrante consiste en un sensor de vibración encapsulado dentro de un protector de acero. El elemento sensor está formado esencialmente de un cable de acero tensionado y unido a una membrana y un tubo principal. La tecnología de cuerda vibrante del piezómetro opera midiendo la frecuencia vibratoria del cable de acero por medio de una bobina electromagnética. La

presión del agua causa que la membrana se desvíe de su estado anterior, reduciendo la tensión en el cable y cambiando la frecuencia vibratoria medida por la bobina electromagnética. La señal obtenida, es transmitida al equipo de lectura mediante un cable. El valor monitoreado es una frecuencia que es convertida a presión de agua.

El elemento sensor es herméticamente sellado a modo de proteger el acero contra la corrosión. El piezómetro es equipado con un protector de sobretensión de corriente eléctrica y resiste interferencias eléctricas o de frecuencias de radio.

La mayor ventaja es que no habrá menor precisión aumentando la longitud del cable, y las presiones del agua en suelos con baja permeabilidad hidráulica pueden medirse en forma confiable por medio del piezómetro de cuerda vibrante.

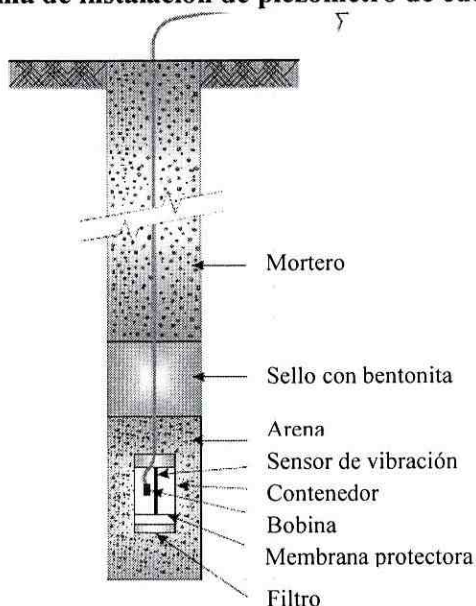
Ilustración 46: Piezómetro de cuerda vibrante



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Durante la instalación del piezómetro se debe tener cuidado con el aislamiento de la superficie de medición. Esto asegurará que, las influencias causadas por otros niveles de agua del terreno o por agua que llegue desde la superficie, no afecten las mediciones. Por lo general, es posible instalar varios piezómetros en una perforación, pero el aislamiento de múltiples superficies puede ser complicado.

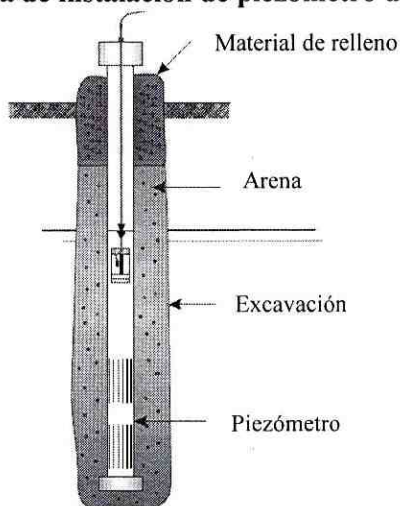
Ilustración 47: Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante



Fuente: http://www.geodataandina.cl/pdf_es/spiezome.pdf

La instalación también puede realizarse mediante la utilización de una tubería de piezómetro vertical abierta para medir el nivel de agua del terreno, la que puede equiparse con un sensor de cuerda vibrante para lecturas automáticas o remotas. Siempre se debe tener especial cuidado para asegurarse de contar con un apropiado sellado en la superficie, a modo de prevenir que el agua fluya dentro de la perforación, ya que esto produciría lecturas poco fiables y posibles errores en la interpretación de resultados.

Ilustración 48: Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante



Fuente: http://www.geodataandina.cl/pdf_es/spiezome.pdf

D. Celdas de presión total

Se utilizan para el monitoreo de la presión estática total (suelo y agua) en el terraplén de una presa de tierra, en su cimentación, contra la superficie de conductos de concreto o en estructuras adyacentes. Estas celdas pueden ser neumáticas o eléctricas, ambas con facilidad y rapidez en los procedimientos de lectura. Todas las celdas de presión consisten en dispositivos formados por dos platos soldados en su perímetro y llenos con un líquido especial. Este dispositivo principal es conectado, mediante un tubo de acero, a un sensor de presión. Las variaciones de presión en el líquido, como consecuencia de la carga actuando sobre el dispositivo, son percibidas mediante el sensor de presión.

Las principales limitaciones de las celdas de presión total consisten en su poca durabilidad a largo plazo y en que es necesario colocar un piezómetro en su vecindad para determinar la presión de poro y sustraerla de la total con el fin de conocer la presión estática. Una ventaja de estos instrumentos es que la elevación de los conductos y el sitio de lectura son independientes del nivel de la celda, lo cual permite el uso de un sistema central de observación.

Ilustración 49: Esquema de instalación de piezómetro de cuerda vibrante



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Dependiendo de los requerimientos de instalación, encontramos principalmente los siguientes modelos:

1. Celdas de presión para estructuras de concreto. Este primer modelo consiste en una celda que puede ser circular o rectangular diseñada para mediciones de esfuerzos tangenciales y radiales para estructuras de concreto. La resistencia de estos instrumentos permite enterrarlos dentro del suelo o ser fundidos con el concreto de las estructuras.

A pesar de ser instrumentos altamente flexibles, la sensibilidad de los esfuerzos en las direcciones distintas a aquellas normales a las caras, pueden reducirse con el uso. Estos instrumentos deberán ser instalados con un tubo de represurizado para restablecer el contacto de las celdas con la estructura después del curado del concreto.

2. Celdas de presión para rellenos o terraplenes. El segundo tipo de celdas está diseñado para medir la presión total únicamente en rellenos o terraplenes. Su resistencia es baja, lo cual incrementa su sensibilidad. Estos instrumentos por lo general incorporan sistemas de fácil instalación y sistemas de lectura de temperatura para cualquier ajuste necesario.

E. Celdas de carga

Las celdas de carga son sensores de carga electrónicos cuya finalidad es recibir la señal eléctrica provocada por una fuerza aplicado a la plataforma y transmitirlo hacia un indicador de carga en forma de una salida eléctrica.

Existe en mercado una muy amplia variedad de celdas de carga, las cuales varían en forma, tamaño, material, etc. En la actualidad, los fabricantes prefieren el uso de celdas de carga basadas en galgas extensiométricas, para sus diseños.

A continuación se mostraran algunas de los distintos tipos de celdas de carga disponibles, y luego se profundizara en las celdas de carga basadas en galgas extensiométricas, debido a su popular uso mencionado anteriormente.

1. Celda de carga hidráulica. Son dispositivos basados en el principio de fuerza-balance, que miden carga como un cambio en la presión del líquido con el cual esta relleno internamente. Estos instrumentos consisten en celdas de carga formadas por dos elementos soldados en su contorno, ensamblados con precisión y especialmente diseñados para aplicaciones de ingeniería civil. La celda se encuentra rellena por un fluido y está construida en acero inoxidable.

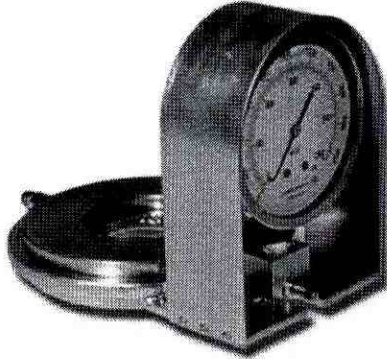
El funcionamiento de estos dispositivos se basa en la identificación de las variaciones inducidas en la presión del fluido cuando es aplicada la carga. La fuerza actuante sobre un cabezal de carga es transferida a un pistón que, a su vez comprime el fluido confinado la cámara. A medida que la fuerza aumenta, la presión del fluido hidráulico crece. La presión en la célula de carga se mide a través de un manómetro conectado directamente a la celda.

Se identifican dos tipos de configuraciones distintas, según el tipo de carga prevista. Para el monitoreo de fuerzas de tensión, se utilizan celdas con un agujero central que permite colocar un anclaje a través de éste. Por el contrario, para el monitoreo de cargas de compresión, se utilizan las celdas sólidas. En ambos casos, es posible la toma de lectura automática mediante sensores de vibración o hidráulicos con las características necesarias.

El tamaño compacto de estos elementos permite la fácil instalación y una rápida y simple lectura. Estos instrumentos toleran pequeñas inclinaciones de la carga aplicada. Sin embargo, para mayores inclinaciones se requiere de la utilización de bases especiales.

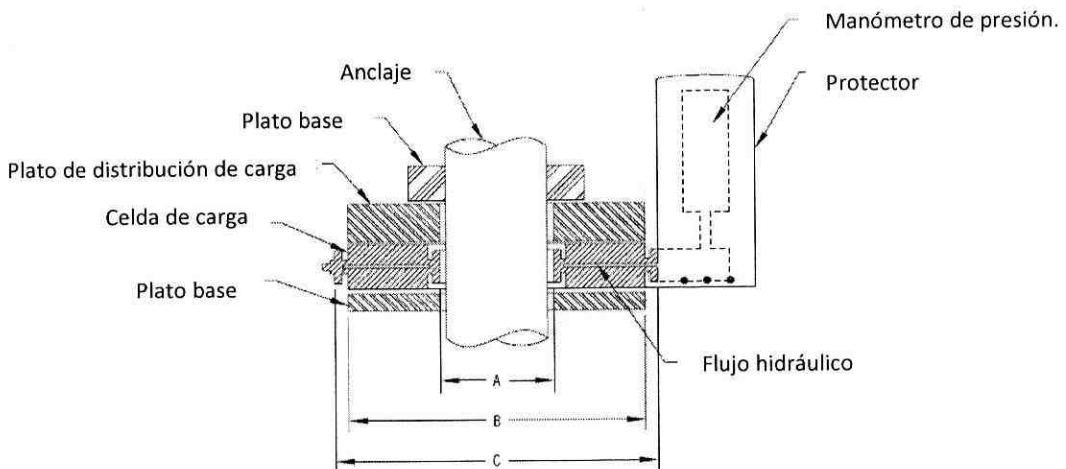
La salida es lineal y es relativamente poco afectada por la cantidad del fluido de relleno o por su temperatura. Si las celdas de carga han sido correctamente instaladas y calibradas, la precisión puede estar dentro del 0.25%, lo cual es aceptable para la mayoría de las aplicaciones. Debido a que este sensor no tiene componentes eléctricos, es ideal para el uso en zonas peligrosas. Para la máxima precisión, la carga debe ser obtenida por la localización de una celda de carga en cada punto de apoyo y resumir sus resultados.

Ilustración 50: Celda de carga hidráulica



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Ilustración 51: Esquema de aplicación típica de celda de carga hidráulica



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

2. Celdas de carga neumáticas. Las celdas de carga neumáticas también operan bajo el principio de fuerza-balance. Estos dispositivos utilizan múltiples cámaras de amortiguación para proporcionar una mayor precisión que los sistemas hidráulico. Los transmisores neumáticos generan una señal que varía linealmente entre valores establecidos, según la presión de salida. Existen varias configuraciones posibles basándose todas ellas en un sistema mediante el cual se regula la presión de la señal de salida. El movimiento nos determina la presión de salida, así sólo queda regular el movimiento de éste en función de la señal de entrada.

Las celdas de carga neumáticas se utilizan a menudo para medir cargas relativamente pequeñas. Las ventajas de este tipo de celda de carga incluyen el ser completamente a prueba de explosiones e insensible a las variaciones de temperatura. Además, no contienen líquidos que puedan contaminar el proceso si se rompe el diafragma. Las desventajas incluyen la relativamente baja velocidad de respuesta y la necesidad de aire o nitrógeno limpio y seco.

3. Celdas de carga basadas en galgas extensiométricas. El principio básico de este tipo de celdas de carga está basado en el funcionamiento de cuatro galgas extensiométricas dispuestas en una configuración especial. Una galga extensométrica es un sensor cuya resistencia eléctrica cambia cuando se somete a un esfuerzo mecánico (compresión o tensión) que lo deforma. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga.

Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada. El sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora, que se encuentra adherido a la galga extensiométrica. De este modo, las deformaciones que se produzcan en el objeto en el cual está adherido la galga, provocarán una variación de la longitud y, por consiguiente, una variación en la resistencia.

Otro principio de funcionamiento de las galgas se basa en la deformación de elementos semiconductores. Este tipo de sensor semiconductor posee un factor de sensibilidad más elevado que el constituido por una galga extensiométrica estándar. Las variaciones se producen tanto en la longitud como en la sección del elemento.

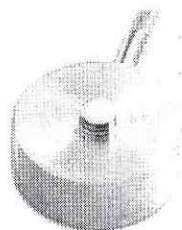
En las galgas extensiométricas, el sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino. Las terminaciones del hilo acaban en dos terminales a los cuales se conecta el transductor. Por otro lado, en las galgas semiconductoras se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estas galgas respecto a las anteriores se encuentra en el tamaño, ya que las galgas semiconductoras tienen un tamaño más reducido.

Dentro de las celdas de carga basadas en las galgas extensiométricas, también existen distintos tipos, diferenciándose en forma, tamaño y en la forma en que se realiza la medida. Algunos de estos tipos se ven a continuación.

a. Celdas de carga de compresión. Como lo dice su nombre, son celdas de carga que miden según su compresión con una excelente estabilidad a largo plazo. En su mayoría, son

construidas en acero inoxidable para asegurar la fiabilidad en entornos industriales. Están diseñadas para operar montadas a una superficie plana, y tienen un botón de carga mecanizado como parte integrante de la celda de carga básica.

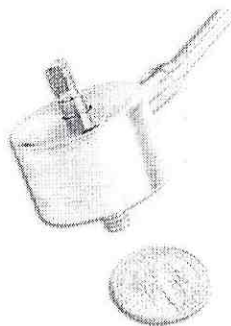
Ilustración 52: Celda de carga de compresión



Fuente: <http://www.nib.fmed.edu.uy/>

4. Celdas de carga de tensión y compresión. Estas celdas permiten medir tanto la tensión como la compresión de las cargas. Están hechas de acero inoxidable, son de tamaño pequeño y son capaces de ofrecer lecturas de alta precisión.

Ilustración 53: Celda de carga de tensión y compresión



Fuente: <http://www.nib.fmed.edu.uy/>

5. Celdas de carga de resistencia eléctrica. Estos instrumentos consisten en sensores resistentes y compactos utilizados para la medición de cargas en túneles, cimentaciones, anclajes, puntales y otras estructuras de soporte. Estos instrumentos están diseñados para resistir las demandas de condiciones ambientales severas, usualmente asociadas con actividades de construcción y minería.

En las celdas de carga con resistencia eléctrica se diferencian dos tipos de configuraciones, según las condiciones de carga. Al igual que en el caso de las celdas hidráulicas, para el monitoreo de cargas de tensión, las celdas de carga poseen un agujero central para permitir el paso de un anclaje a través de ésta. Para el monitoreo de cargas de compresión, la celda de carga es suministrada con platinas de centros sólidas colocadas en los extremos de los elementos sensores.

El elemento sensor consiste en una bobina de acero o aluminio con alta resistencia al calor y a los efectos de cargas. Los manómetros son colocados alrededor de la bobina en una configuración en puente para compensar la distribución variable de las cargas, los cuales deberán ser resistentes a las señales eléctricas. Se utilizan manómetros con alta resistencia a la tensión para minimizar los efectos de cable. Así mismo, es necesaria la compensación por las variaciones de temperatura durante la operación del instrumento.

Una cubierta de acero protege la bobina y los manómetros de posibles daños mecánicos e infiltraciones de agua. Un cable es colocado en la celda para la transmisión de lecturas. En grandes celdas, la salida del cable es paralela a la superficie del protector de acero para garantizar una mejor transmisión.

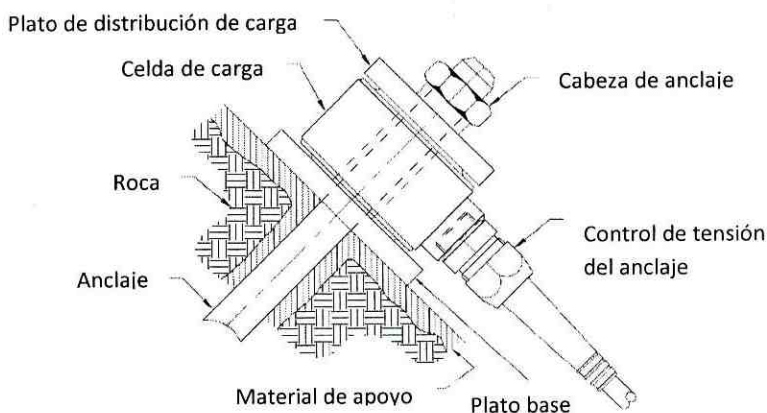
La superficie sobre la cual es apoyada la celda, deberá ser lisa y perpendicular al eje del anclaje o estructura de interés. Un soporte de base, formada por una capa de mortero o concreto es requerido. También es recomendable el uso de una platina de transmisión de carga entre la base de la celda y el soporte sobre la superficie. La platina de transmisión, la celda de carga, el plato de distribución de carga y la cabeza de anclaje se encuentran de forma consecutiva sobre la superficie de la estructura.

Ilustración 54: Celda de carga para anclaje



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

Ilustración 55: de instalación típica de celda de carga para anclajes



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

6. Celdas de carga de cuerda vibrante. Estos instrumentos tienen la misma configuración y modo de funcionamiento que las celdas de carga resistencia eléctrica. Así mismo, requieren los mismos cuidados durante su uso e instalación.

La principal diferencia de este tipo de celdas de carga es que los esfuerzos de compresión inducidos en la celda mediante la tensión en el anclaje son medidos mediante seis sensores de vibración. El promedio de las lecturas de esfuerzos de los sensores, representa el promedio de carga en el anclaje, minimizando de esta forma los efectos de cargas excéntricas.

F. Péndulos

Estos instrumentos se diseñan para obtener mediciones precisas de movimientos horizontales en estructuras, relativos a puntos a lo largo de una línea vertical. Su fiabilidad, precisión y excelente comportamiento a largo plazo, los han hecho imprescindibles para el control de desplazamientos horizontales en presas de concreto.

Las aplicaciones incluyen el monitoreo de movimientos dentro de las presas y en sus cimentaciones, en estaciones de energía nuclear, en viaductos y puentes. Así también el monitoreo de movimientos estructurales y de cimentaciones en edificios. El instrumento posee gran importancia en el monitoreo y detección de desplazamiento o volteo de elementos de estructuras como presas.

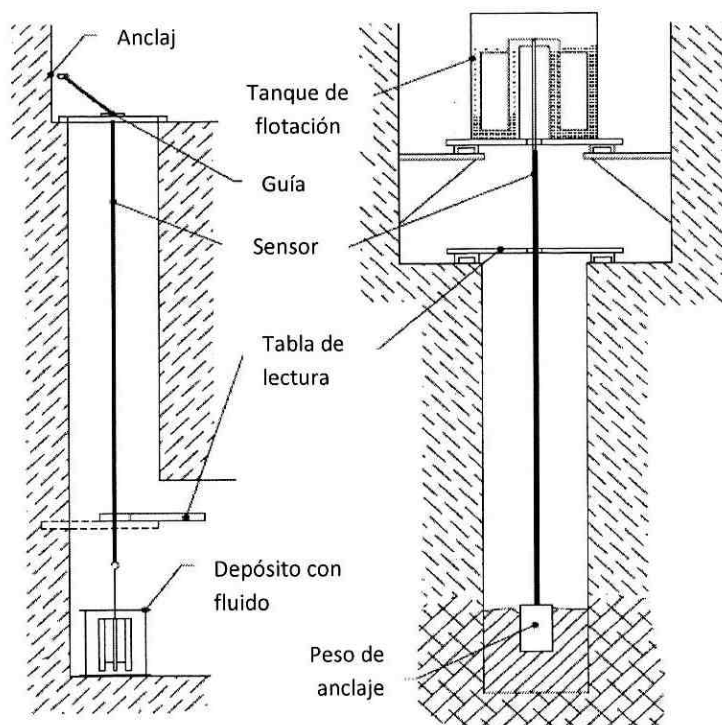
Por sus características, podemos distinguir estos elementos en péndulos directos y péndulos indirectos.

1. Péndulo directo. El péndulo directo permite medir movimientos horizontales de la estructura relativos a su punto superior. Consta de un cable de acero situado en un pozo vertical, anclado en su extremo superior a la estructura y en su extremo inferior a un peso con aletas inmerso en un depósito relleno de aceite. Esta disposición asegura la verticalidad y tensión en el cable.

2. Péndulo inverso. El péndulo inverso permite medir movimientos respecto a su punto inferior. Consta de un cable de acero inoxidable cuyo extremo inferior está unido a un anclaje ubicado en el interior de un pozo vertical, y cuyo extremo superior se fija a una unidad de flotación solidaria a la estructura. El extremo inferior es anclado de manera permanente a la parte inferior del sistema para obtener las mediciones de desplazamientos mediante la longitud del cable. La unidad de flotación está formada por un recipiente con un flotador en baño de aceite y está diseñada de tal forma que permite mantener el cable en tensión sin que el movimiento de la estructura altere su posición.

El monitoreo de la posición del cable puede ser obtenido de manera manual o electrónica para ambos casos. El método a utilizarse depende de la precisión requerida, de los valores esperados de movimiento y de concepto de monitoreo.

Ilustración 56: Esquema de péndulo directo e inverso



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

G. Sismógrafo

Para obtener el registro del movimiento del suelo en caso de sismo, es necesario tener como referencia un punto fijo al cual tendríamos que referirlo, lo cual sería imposible por cuanto el punto fijo se movería junto con el suelo. Dada esta dificultad, se recurre al principio de inercia de cualquier cuerpo, por el cual todos los cuerpos tienden a resistirse al movimiento o a variar su velocidad. Por lo tanto, el movimiento del suelo puede ser medido en función de una masa suspendida por algún elemento que le permita mantenerse en reposo con respecto al suelo.

El mecanismo más simple considera una masa suspendida de un resorte que está atado a un soporte anclado al suelo. Cuando el resorte se agita al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo punto de reposo y cuando sale del mismo, tiende a oscilar. Es lógico pensar que la oscilación posterior del péndulo no reflejaría el real movimiento del suelo; por lo tanto, hay que amortiguarlo. En los sismógrafos antiguos, el amortiguamiento era realizado utilizando aceite y hoy en día se logra con el uso de bobinas o imanes que amortiguan la oscilación libre de la masa.

Si se adhiere a la masa suspendida un pincel o lápiz a fin de que inscriba en un papel sobre un cilindro que gira a tiempo constante, se registraría una componente del movimiento del suelo. El papel o lámina sobre el cual se registra el movimiento del suelo se llama sismograma. Debido a que el movimiento del suelo se realiza en tres dimensiones, es necesario registrarlo además de la componente vertical, en componentes horizontales con péndulos que oscilan en dirección similar al giro de una puerta, con el eje ligeramente inclinado a fin de lograr mayor estabilidad en su movimiento.

El movimiento del suelo con respecto a la masa suspendida se registraba inicialmente por medio de una pluma que inscribía en un tambor giratorio. Luego se implementó el registro en papel fotográfico o sobre película. Actualmente, el registro de los datos se realiza en medios magnéticos (cintas) o en sistemas digitales mejorando la calidad de los mismos. Asimismo, el control de tiempo es realizado mediante relojes satélites o los ya comunes GPS.

El principio físico de todos los tipos de sismógrafos se basa en la propiedad física de un péndulo (masa suspendida de un hilo) que al producirse el movimiento del suelo, este se desplaza con respecto a la masa suspendida en virtud de su inercia. Todos estos movimientos deben ser registrados en función del tiempo y dependiendo del tipo de movimiento al cual son sensibles (velocidad, desplazamiento o aceleración). La sismometría considera tres tipos de sismógrafos: mecánico, electromagnético y de banda ancha.

1. Sismógrafos mecánicos. Este sismógrafo es el más simple y está constituido por un elemento detector del movimiento (sismómetro) y un sistema de palancas que amplifican dicho movimiento. El sismómetro vertical más simple está formado por una masa suspendida por un muelle con valores propios de la constante elástica y la amortiguación viscosa que caracterizan cada sistema. Cuando el soporte anclado a la superficie de la tierra recibe una excitación, la masa se mueve con un movimiento de tal manera que el desplazamiento relativo de la masa con respecto al soporte es la diferencia entre estos desplazamientos.

2. Sismógrafos electromagnéticos. La única variación de este sismógrafo en relación al anterior, es que el desplazamiento de la masa produce el movimiento relativo de una bobina en el campo magnético de un imán. En este caso la parte móvil es el imán y en otros la bobina. Al producirse el movimiento del suelo se genera una corriente en la bobina proporcional a la velocidad de movimiento del suelo, la cual pasa por un galvanómetro y produce una cierta deflexión del espejo. Ahora, si se ha hecho incidir un haz de luz sobre el espejo unido al hilo del galvanómetro, éste sufrirá una desviación, que es recogida en un papel fotográfico proporciona el movimiento del sismómetro.

A fin de conocer la respuesta de todo el sistema debe considerarse por separado el del sismómetro y del galvanómetro. Para el segundo debe considerarse además, una nueva fuerza generada por la corriente en la bobina que crea una fuerza de reacción. La corriente generada por la bobina pasa por el galvanómetro mediante un circuito de tal manera que la corriente que pasa por la bobina del galvanómetro es menor que la corriente en la bobina. En resumen, se tiene que un movimiento angular del sismómetro producido por un desplazamiento vertical del suelo, genera una corriente que mediante un circuito pasa a la bobina del galvanómetro produciendo una deflexión. El producto de ambas curvas de amplificación es equivalente al total del sismógrafo electromagnético.

3. Sismógrafos de banda ancha. Por lo general, los sismógrafos eran de dos tipos o registraban información sísmica en dos diferentes rangos de frecuencia, periodos cortos (1 seg) y periodos largos (15-100 seg). El primero adecuado para sismos que ocurren en el campo cercano y los segundos en el campo lejano.

Sin embargo, después de los años 70, se construyeron instrumentos que permitían registrar mayores rangos de frecuencia y que incluían los registros de periodo corto y largo; es decir, entre 0.1-100 segundos. Estos sismógrafos se llaman de Banda Ancha.

Este adelanto en la sismometría se logró gracias a los progresos conseguidos en el modo de registro (registros magnéticos digitales) y en el desarrollo del sismómetro de balance de fuerzas de Wieland y Strekeisen. Con el objetivo de registrar esta información de manera digital, se hace uso de convertidores analógico-digital de 12, 16 y 24 bits que permiten cubrir rangos dinámicos del orden de 140 db (1/10000000). Se cuenta con cintas magnéticas y discos ópticos que permiten eliminar los problemas de almacenamiento.

4. Sismógrafos de deformación. Construido en los años 30 por H. Benioff a fin de medir las deformaciones que tienen lugar en la superficie de la tierra. Es decir, variaciones lineales entre dos puntos fijos.

El instrumento consta de un tubo de cuarzo de 10 a 100 metros de longitud cuyo extremo se encuentra rígidamente unido a un pilar y el otro libre a una distancia determinada de otro pilar. La distancia se mide con un transductor de velocidad que pueda detectar cambios del orden de 1mm para una barra de longitud igual a 100 metros, proporcionando una sensibilidad en deformación del orden de 10^{-11} .

5. Acelerógrafos. En las proximidades del hipocentro de un sismo, el paso de las ondas sísmicas produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones elevadas dependiendo de la magnitud del sismo y de su distancia epicentral. Esta zona llamada "campo cercano" es de interés para ingeniería sísmica ya que aquí se producen los mayores daños en las estructuras.

Debido a las altas frecuencias que se generan (0.05-0.10 segundos) solo pueden ser registrados correctamente con los acelerógrafos. Este sistema no registra en continuo y generalmente se activa al ser excitado por una onda sísmica que se registra a alta velocidad en película, cinta magnética o disco digital.

Durante el registro de la aceleración de un sismo, paralelamente se realiza el registro del tiempo. A partir de esta información puede obtenerse mediante integración registros en velocidad y desplazamiento en el campo próximo.

H. Medidor de juntas o grietas

Para estudiar los desplazamientos relativos entre bloques, en las intersecciones de las juntas que cortan la estructura, se utilizan medidores de juntas tridimensionales. Estos instrumentos se utilizan para el control de juntas de dilatación en estructuras de concreto, control de fracturas en rocas y en general en aquellas obras como presas, puentes, etc., en las que se requiere un control preciso de deformaciones.

Los datos obtenidos con este tipo de instrumentos, se utilizan principalmente para contrastar los obtenidos con otros métodos de auscultación

Ilustración 57: Medidor de juntas electromecánico



Fuente: <http://www.nib.fmed.edu.uy/>

VII. Guía de instrumentación geotécnica para la auscultación de proyectos hidroeléctricos

A. Descripción general

Cuadro 2: Información general

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO				
Nombre del P.H.:				
Ubicación:				
Descripción:				
Potencia generada (MW):				
Descripción general de los usos y usuarios:				
Zona sísmica	Alta <input type="checkbox"/>	Medio <input type="checkbox"/>	Bajo <input type="checkbox"/>	
Coordenadas de bench mark:				
Tipo de inspección requerido	Rutina <input type="checkbox"/>	Intermedias <input type="checkbox"/>	Especiales <input type="checkbox"/>	Seguridad <input type="checkbox"/>
Altura (m):				
Volumen embalsado (m ³):				
Tipo				
Presas de fábrica	Presas de gravedad <input type="checkbox"/>	Presas aligeradas <input type="checkbox"/>	Presas de bóveda: Arco <input type="checkbox"/> Arco gravedad <input type="checkbox"/> Cúpula <input type="checkbox"/>	
Presas de materiales sueltos	Tierra <input type="checkbox"/>	Escollera <input type="checkbox"/>	Tierra – Escollera <input type="checkbox"/>	Mixtas <input type="checkbox"/>
Presas especiales <input type="checkbox"/>				
Descripción general y observaciones:				
Longitud (m):				
Dimensiones (m):				
Forma	Rectangular <input type="checkbox"/>	Trapezoidal <input type="checkbox"/>	Semicircular <input type="checkbox"/>	
Descripción general y observaciones:				
Longitud (m):				

Continuación Cuadro 2.

Dimensiones (m):			
Recubrimiento	Concreto <input type="checkbox"/>	Blindaje <input type="checkbox"/>	Cerchas <input type="checkbox"/>
Descripción general y observaciones:			
Tipo	Pelton <input type="checkbox"/>	Francis <input type="checkbox"/>	Kaplan <input type="checkbox"/>
Cantidad:			
Descripción general y observaciones:			

B. Planos de ubicación

Colocar plano de ubicación del Proyecto.

C. Auscultación por elemento

1. Presa

Cuadro 3: Auscultación de presas

<u>PRESA</u>			
Instrumentación			
Parámetros de interés	Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Neumático <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
Otro:			
Ubicación:			
Descripción:			
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Roca/suelos <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Otro:	Remota <input type="checkbox"/>	
Ubicación:			
Descripción:			

Continuación Cuadro 3.

Instrumentación			
Parámetros de interés:		T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>
Instrumentación:			
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Instrumentación			
Sismógrafos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mecánico <input type="checkbox"/> Electromagnético <input type="checkbox"/> De banda ancha <input type="checkbox"/> De deformación <input type="checkbox"/> Acelerógrafo <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Instrumentación			
Deformación externa			
Parámetros de interés		Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>
		Juntas <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Péndulos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Directo <input type="checkbox"/> Inverso <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 3.

Desplazamientos				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontales <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Péndulos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Directo <input type="checkbox"/> Inverso <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Instrumentación				
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>		Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			

Continuación Cuadro 3.

Descripción del equipo:
Descripción del método de medición:
Distribución y ubicación:

2. Túnel

Cuadro 4: Auscultación de túneles

<u>TÚNEL</u>			
Parámetros de interés	Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Parámetros de interés:	T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>	
Instrumentación:			
Termómetros	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 4.

Deformación externa

Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>
------------------------------	--	----------------------------------	---------------------------------

Instrumentación

	Tipo	Lectura	Cantidad
Teodolito <input type="checkbox"/>		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Deformación interna

Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>

Instrumentación

	Tipo	Lectura	Cantidad
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 4.

Parámetros de interés			
		Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Neumática <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/>		
Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/>			
Otro:			
Ubicación:			
Descripción:			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

3. Canal

Cuadro 5: Auscultación de canales

<u>CANAL</u>			
Parámetros de interés			
		Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>
			Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Neumático <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Cuerda vibrante <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	Otro:		
Ubicación:			
Descripción:			
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Roca/suelos <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Otro:	Remota <input type="checkbox"/>	
Ubicación:			
Descripción:			

Continuación Cuadro 5.

Instrumentación				
Parámetros de interés:	T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>		
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Instrumentación				
Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>	
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Instrumentación				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			

Continuación Cuadro 5.

Continuación Cuadro 5.			
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Aislamiento de las piezas			
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Atribución de equipos			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

4. Tubería forzada

Cuadro 6: Auscultación de tubería forzada

<u>TUBERÍA FORZADA</u>				
Auscultación térmica				
Parámetros de interés:		T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>	
Instrumentación:				
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Auscultación de deformaciones				
Deformación externa				
Parámetros de interés		Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Deformación interna				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			

Continuación Cuadro 6.

Continuación Cuadro 6.			
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Descripción de esfuerzos			
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>		Compresión <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

5. Casa de máquinas

Cuadro 7: Auscultación de casa de máquinas

CASA DE MAQUINAS			
Parámetros de interés			
Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Parámetros de interés:			
T. ambiente <input type="checkbox"/>		T. estructura <input type="checkbox"/>	
Instrumentación:			
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Instrumentación			
Sismógrafos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mecánico <input type="checkbox"/> Electromagnético <input type="checkbox"/> De banda ancha <input type="checkbox"/> De deformación <input type="checkbox"/> Acelerógrafo <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 7.

Deformación externa				
Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Deformación interna				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			

Continuación Cuadro 7.

Auscultación de obras			
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Auscultación geodésica			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

6. Obras auxiliares

Cuadro 8: Auscultación de obras auxiliares

<u>OBRAS AUXILIARES</u>			
Auscultación de obras			
Parámetros de interés	Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 8.

Instrumentación				
Parámetros de interés:		T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>	
Instrumentación:				
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Instrumentación				
Sismógrafos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Mecánico <input type="checkbox"/> Electromagnético <input type="checkbox"/> De banda ancha <input type="checkbox"/> De deformación <input type="checkbox"/> Acelerógrafo <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Deformación externa				
Parámetros de interés		Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Deformación interna				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>

Continuación Cuadro 8.

Instrumentación			
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Auscultación de esfuerzos			
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

VIII. Propuesta de monitoreo para el proyecto hidroeléctrico de Poza Verde

A. Descripción del proyecto

La construcción del proyecto se ha desarrollado en varias etapas:

- Primera Etapa: 1.5 MW en 1,985
- Segunda Etapa: 8.34 MW en 2,000
- Tercera Etapa: 14.5 MW en 2,007
- Cuarta Etapa: 18 o 20.0 MW en 2,010

1. Primera etapa: 1.5 MW en 1,985

- Caudal: 6 m³/seg
- Caída neta: 26 metros
- Presa de desviación
- 500 metros de conducción
- Presa de derivación y dos canales desarenadores (160 x 5 metros cada uno)
- 490 metros de túnel
- Casa de máquinas
- Dos turbinas Morgan Smith de 1.0 MW y 0.5 MW
- Subestación de 2 KVA, de 440 v/13.2 Kv
- Subestación de 3.5 KVA, de 13.2 Kv/ 69.0Kv
- Cuatro kilómetros de línea en 13.2 Kv

2. Segunda etapa: 8.34 MW en 2,000

- Caudal 7 m³/seg
- Caída neta: 130 metros
- Utilizó toda la infraestructura de la Primera Etapa, salvo la tubería de presión y Casa de Máquinas
- Cuatro nuevos túneles: 1,230mts + 220mts + 100mts + 90mts, con un total de 1,640 metros de conducción.
- Dos sifones invertidos: 467mts + 275mts, con un total de 742 metros de conducción
- Un total de 2,571metros de canales cerrados
- 282 metros de tubería de presión
- Casa de máquinas
- Dos turbinas de 4.17MW cada una
- Subestación de 15MVA

3. Tercera etapa 1: 2.0 MW en 2,007

- Caudal 10.5 m³/seg
- Caída neta: de 23 a 15 metros
- Presa de 14 metros alto por 120 metros largo
- Túnel y tubería cerrada: 360 metros
- Turbina Kaplan-A 2.0

- Subestación de 2.5 MVA

4. Tercera etapa 2: 12.5 MW en 2,007

- Caudal 10.5 m³/seg
- Caída neta: 130 metros
- Utilizo toda la infraestructura de la segunda etapa con refuerzos en obra civil y túneles.
- Se modificó casa de máquinas
- Turbina de 3.17 MW

5. Tercera etapa:

- Total: 14.5 MW en 2,007
- Huracán Stán: 5 Octubre 2,005 provocó que la presa se llenara y llegara a nivel de vertimiento a lo largo de las celdas, a una altura de 50 cms. sobre la cortina de concreto.

6. Cuarta etapa: 18 MW en 2,010

- Se utiliza toda la infraestructura existente y se agrega el caudal de otra cuenca.
- Una turbina de 3.17 MW
- Construcción de 400 metros de túnel
- 2,700 metros de canal cerrado
- 350 metros de tubería de presión

Ilustración 58: Hidroeléctrica Poza Verde



Cuadro 9: Información general

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	
Nombre del P.H.:	<i>Poza Verde</i>
Ubicación:	<i>Guatemala</i>
Descripción:	
Potencia generada (MW):	<i>hasta 20MW en 2010</i>
Descripción general de los usos y usuarios:	<i>abastecimiento de energía a población</i>

Continuación Cuadro 9.

Zona sísmica	Alta <input checked="" type="checkbox"/>	Medio <input type="checkbox"/>	Bajo <input type="checkbox"/>	
Coordenadas de bench mark:				
Tipo de inspección requerido	Rutina <input checked="" type="checkbox"/>	Intermedias <input type="checkbox"/>	Especiales <input type="checkbox"/>	Seguridad <input type="checkbox"/>
Altura (m): 14m				
Volumen embalsado (m ³): 360,000 m ³				
Tipo				
Presas de fábrica	Presas de gravedad <input type="checkbox"/>	Presas aligeradas <input type="checkbox"/>	Presas de bóveda: Arco <input checked="" type="checkbox"/> Arco gravedad <input type="checkbox"/> Cúpula <input type="checkbox"/>	
Presas de materiales sueltos	Tierra <input type="checkbox"/>	Escollera <input type="checkbox"/>	Tierra – Escollera <input type="checkbox"/> Mixtas <input type="checkbox"/>	
Presas especiales <input type="checkbox"/>				
Descripción general y observaciones: Presa de arcos múltiples				
Longitud (m): 2,571m				
Dimensiones (m): variable				
Forma	Rectangular <input checked="" type="checkbox"/>	Trapezoidal <input type="checkbox"/>	Semicircular <input type="checkbox"/>	
Descripción general y observaciones:				
Longitud (m): 1,640m				
Dimensiones (m): 4m de altura y 2m de ancho				
Recubrimiento	Concreto <input checked="" type="checkbox"/>	Blindaje <input type="checkbox"/>	Cerchas <input type="checkbox"/>	
Descripción general y observaciones: forma de herradura				
Tipo	Pelton <input type="checkbox"/>	Francis <input type="checkbox"/>	Kaplan <input checked="" type="checkbox"/>	
Cantidad: 4				
Descripción general y observaciones:				

B. Ubicación del proyecto

Ilustración 59: Ubicación hidroeléctrica Poza Verde

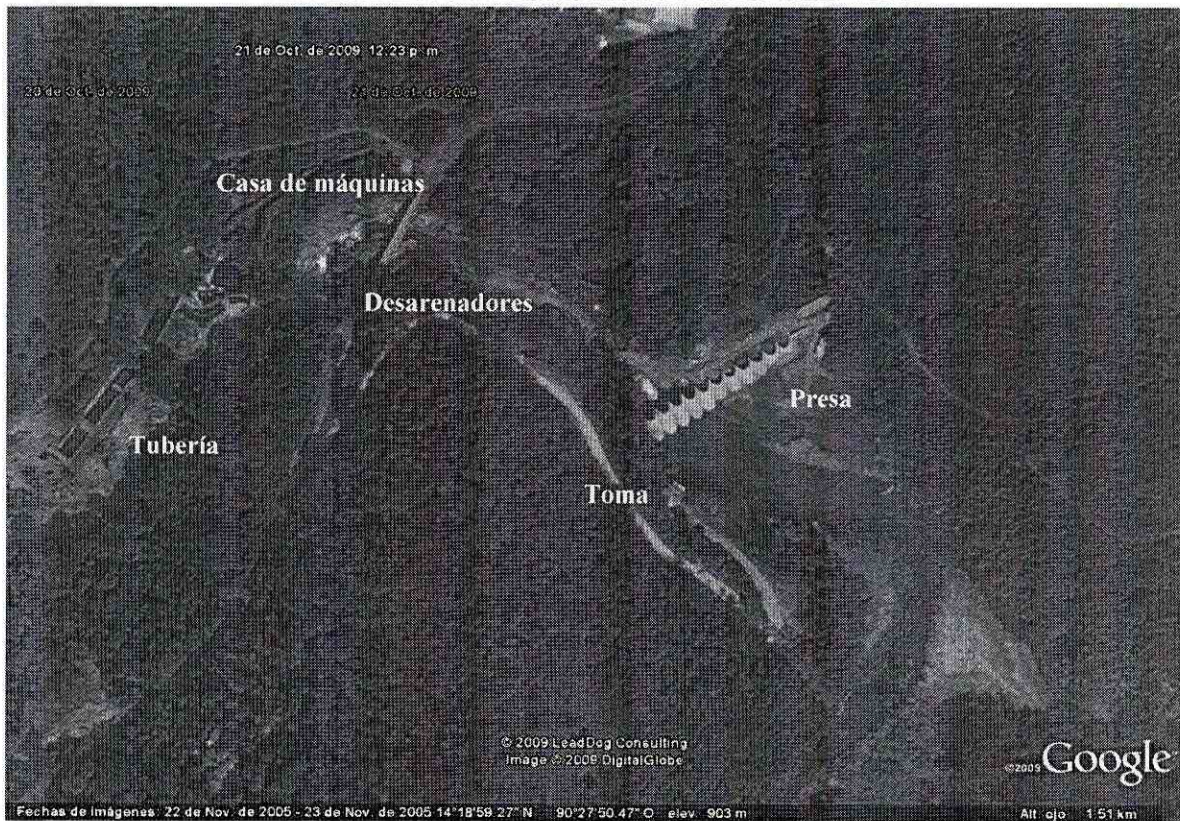
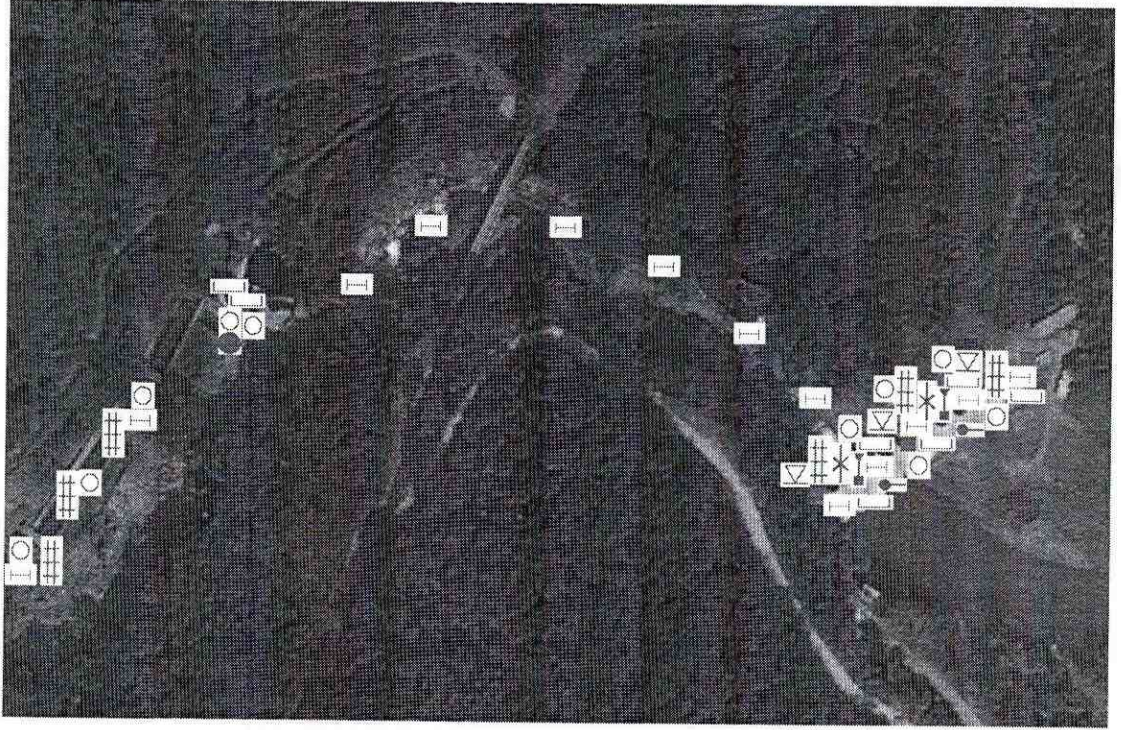


Ilustración 60: Instrumentación geotécnica para el proyecto hidroeléctrica Poza Verde



Piezómetro de sistema cerrado ■

Piezómetro de sistema abierto ▽

Extensómetro de cinta —|—

Pédulo directo ▽

Pédulo inverso ■

Extensómetro de barra *

Inclinómetro #

Termómetro ○

Celdas de carga ●

Estación de lectura ▲

C. Auscultación de elementos

Cuadro 10: Auscultación de presa

<u>PRESA</u>			
Parámetros de interés	Filtraciones X	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones X
Instrumentación			
Piezómetros X	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico X Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante X Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica X Remota <input type="checkbox"/>	3 hidráulicos 3 cuerda vibrante
	Ubicación: Base de la presa.		
	Descripción: - Cuerda Vibrante: 20m de longitud y 7cm de diámetro. - Hidráulico: 20m de longitud y 2.5 cm de diámetro.		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Parámetros de interés:	T. ambiente X	T. estructura X	
Instrumentación:			
Termómetros X	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio X De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual X Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	5
	Ubicación: 2 en la corona y 3 en la base de la presa		
	Descripción: Rango de -10 a 100°C		
Instrumentación			
Sismógrafos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mecánico <input type="checkbox"/> Electromagnético <input type="checkbox"/> De banda ancha <input type="checkbox"/> De deformación <input type="checkbox"/> Acelerógrafo <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 10.

Deformación externa				
Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input checked="" type="checkbox"/>	Juntas <input checked="" type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
Descripción:				
Péndulos <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Directo <input type="checkbox"/> Inverso <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
Descripción:				
Medidores de grietas y juntas <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input checked="" type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	5	
	Ubicación: 3 en la base de la presa, 1 en estribo derecho y 1 en estribo izquierdo.			
Descripción: Con capacidad de medición de 2.5 cm y precisión de 0.01 mm.				
Desplazamientos				
Parámetros de interés	Horizontales <input checked="" type="checkbox"/>	Verticales <input checked="" type="checkbox"/>	Angulares <input checked="" type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Péndulos <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Directo <input checked="" type="checkbox"/> Inverso <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input checked="" type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	2	
	Ubicación: Desde la parte superior de la presa a intervalos uniformes.			
Descripción: Con una longitud de 14m y precisión de 0.02mm.				
Inclinómetro <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input checked="" type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input checked="" type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	3	
	Ubicación: base de la presa			
Descripción: Con una longitud de 14m, precisión de 0.01mm				

Continuación Cuadro 10.

	Tipo	Lectura	Cantidad
Extensómetro X	Cinta X Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica X Remota <input type="checkbox"/>	5
	Ubicación: <i>Alternando en los arcos que forman la presa, de forma horizontal.</i>		
	Descripción: <i>Con una longitud de 7m, precisión de 0.05mm, anclajes para concreto.</i>		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
Descripción:			
Anclajes de tensión y compresión			
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante X Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica X Remota <input type="checkbox"/>	2
	Ubicación: <i>En la base de la estructura</i>		
Descripción: <i>Capacidad de hasta 1000 KN/m²</i>			
Anclajes de tensión y compresión			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

Cuadro 11: Auscultación de túnel

<u>TÚNEL</u>			
Auscultación de filtraciones			
Parámetros de interés	Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Auscultación de temperatura			
Parámetros de interés:	T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>	
Instrumentación:			
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Auscultación de deformaciones			
Deformación externa			
Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 11.

Desplazamientos				
Parámetros de interés	Horizontes X	Verticales X	Angulares X	Relativos <input type="checkbox"/>
	Instrumentación			
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Extensómetro X	Tipo	Lectura		Cantidad
	Cinta X Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica X Remota <input type="checkbox"/>		Con separación de entre 300m y 500m
	Ubicación: <i>Atravesando el túnel de forma horizontal</i>			
	Descripción: <i>Con una longitud de 3m, precisión de 0.05 mm y anclajes para concreto.</i>			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Ausiliación de ensayos				
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>		Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Ausiliación de equipos				
Descripción del equipo:				
Descripción del método de medición:				
Distribución y ubicación:				

Cuadro 12: Auscultación de canal

<u>CANAL</u>			
Parámetros de interés			
Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/> Roca/suelos <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Parámetros de interés:			
T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura <input type="checkbox"/>		
Instrumentación:			
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia <input type="checkbox"/> Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Deformación externa			
Parámetros de interés			
Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		

Continuación Cuadro 12.

Desplazamientos

Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input checked="" type="checkbox"/>	Verticales <input checked="" type="checkbox"/>	Angulares <input checked="" type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Extensómetro <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Cinta <input checked="" type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input checked="" type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	<i>Separación entre 300 y 500 metros</i>	
	Ubicación: <i>Atravesando el canal de forma horizontal</i>			
	Descripción: <i>Con una longitud de 10m, precisión de 0.05mm y anclajes para concreto.</i>			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Instrumentación de esfuerzos				
Parámetros de interés	Tensión <input type="checkbox"/>		Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Descripción del equipo:				
Descripción del método de medición:				
Distribución y ubicación:				

Cuadro 13: Auscultación de tubería forzada

TUBERÍA FORZADA				
Parámetros de interés:		T. ambiente <input type="checkbox"/>	T. estructura X	
Instrumentación:				
Termómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/> De resistencia X Cuerda vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		<i>Separación entre 300 y 500m</i>
	Ubicación: <i>Sobre la tubería</i>			
	Descripción:			
Deformación externa				
Parámetros de interés		Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input type="checkbox"/>	Juntas X
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura		Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas X	Tipo	Lectura		Cantidad
		Manual X Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		<i>Separación entre 300 y 500m</i>
	Ubicación: <i>en puntos de juntas</i>			
	Descripción: <i>Con capacidad de medición de 2.5 cm y precisión de 0.01 mm.</i>			
Deformación interna				
Parámetros de interés	Desplazamientos			
	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales X	Angulares X	Relativos X
Instrumentación				
Inclinómetro X	Tipo	Lectura		Cantidad
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial X Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica X Remota <input type="checkbox"/>		<i>En cada base de apoyo.</i>
	Ubicación: <i>En las bases de apoyo de la tubería</i>			
	Descripción: <i>Con una longitud de 10m y precisión de 0.01mm</i>			

Continuación Cuadro 13.

Continuación Cuadro 13.			
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Instrumentación de interés:			
Parámetros de interés		Tensión <input type="checkbox"/>	Compresión <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/> Neumática <input type="checkbox"/> Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/> Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/> Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	
	Ubicación:		
	Descripción:		
Instrumentación genérica:			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

Cuadro 14: Auscultación de casa de máquinas

<u>CASA DE MAQUINAS</u>			
<i>Auscultación por filtraciones</i>			
Parámetros de interés	Filtraciones <input type="checkbox"/>	Presión intersticial <input type="checkbox"/>	Subpresiones <input type="checkbox"/>
Instrumentación			
Piezómetros <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulico <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Neumático <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	Otro:		
Ubicación:			
Descripción:			
Celdas de presión <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Concreto <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Roca/suelos <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Otro:	Remota <input type="checkbox"/>	
Ubicación:			
Descripción:			
<i>Auscultación térmica</i>			
Parámetros de interés:	T. ambiente X	T. estructura X	
Instrumentación:			
Termómetros X	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mercurio <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	2
	De resistencia X	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Cuerda vibrante <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	Otro:		
Ubicación: <i>Puntos expuestos a mayores temperaturas en la casa de máquinas</i>			
Descripción: <i>Rango de -10 a 100°C</i>			
<i>Auscultación sísmica</i>			
Instrumentación			
Sismógrafos X	Tipo	Lectura	Cantidad
	Mecánico <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	1
	Electromagnético <input type="checkbox"/>	Electrónica X	
	De banda ancha <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	De deformación <input type="checkbox"/>		
Acelerógrafo X			
Otro:			
Ubicación: <i>en la casa de máquinas en ubicación libre de vibraciones generadas por funcionamiento normal del sistema</i>			
Descripción:			

Continuación Cuadro 14.

Deformación externa				
Parámetros de interés	Desplazamientos <input type="checkbox"/>	Grietas <input checked="" type="checkbox"/>	Juntas <input checked="" type="checkbox"/>	
Instrumentación				
Teodolito <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
Descripción:				
Medidores de grietas y juntas <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input checked="" type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>	<i>variable</i>	
	Ubicación: <i>Puntos críticos en casa de máquinas</i>			
	Descripción: <i>Con capacidad de medición de 2.5 cm y precisión de 0.01 mm.</i>			
Desplazamientos				
Parámetros de interés	Horizontes <input type="checkbox"/>	Verticales <input checked="" type="checkbox"/>	Angulares <input type="checkbox"/>	Relativos <input type="checkbox"/>
Instrumentación				
Inclinómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Uniaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Biaxial resistente <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Portátil <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
Descripción:				
Extensómetro <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
	Cinta <input type="checkbox"/> Barra <input type="checkbox"/> Fibra flexible <input type="checkbox"/> Otro:	Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
	Descripción:			
Medidores de grietas y juntas <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad	
		Manual <input type="checkbox"/> Electrónica <input type="checkbox"/> Remota <input type="checkbox"/>		
	Ubicación:			
Descripción:				

Continuación Cuadro 14.

Parámetros de interés			
Tensión <input type="checkbox"/>		Compresión <input type="checkbox"/>	
Instrumentación			
Celdas de carga <input type="checkbox"/>	Tipo	Lectura	Cantidad
	Hidráulica <input type="checkbox"/>	Manual <input type="checkbox"/>	
	Neumática <input type="checkbox"/>	Electrónica <input type="checkbox"/>	
	Galgas extensiométricas <input type="checkbox"/>	Remota <input type="checkbox"/>	
	Resistencia eléctrica <input type="checkbox"/>		
Cuerda Vibrante <input type="checkbox"/>			
Otro:			
Ubicación:			
Descripción:			
Descripción del equipo:			
Descripción del método de medición:			
Distribución y ubicación:			

D. Auscultación del proyecto

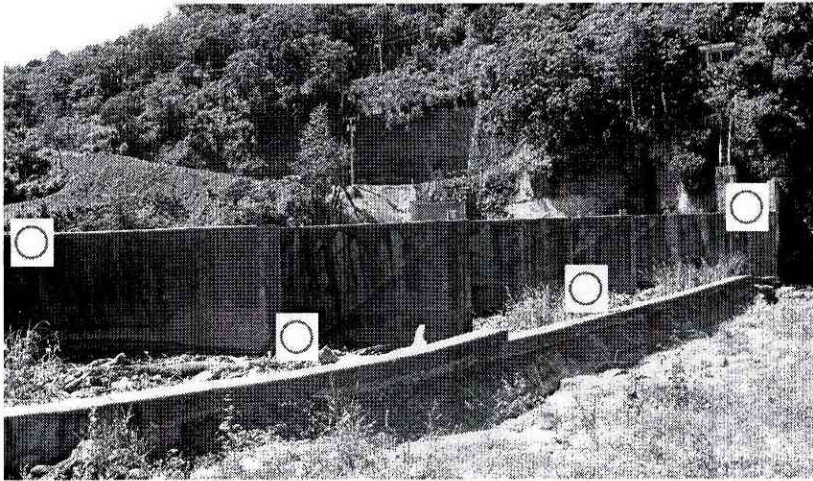
El objetivo principal de proponer un sistema de auscultación para este proyecto es el de ejemplificar la aplicación e importancia de la guía de instrumentación desarrollada en el presente trabajo, cuya finalidad es la de exponer las características generales de un adecuado sistema de auscultación, los parámetros a incluir, los instrumentos adecuados para ello, las frecuencias de lectura que se estiman adecuadas en cada caso, etc. Esto se desarrolla con el objetivo de organizar un conjunto de medidas para la temprana detección de cualquier irregularidad, y permitir un adecuado conocimiento del comportamiento de todos aquellos factores relacionados a las condiciones de seguridad de las obras principales. Se presentan de este modo, la propuesta para el monitoreo de los principales parámetros estructurales en la hidroeléctrica Poza Vede, basándose en las condiciones y características del proyecto.

1. Presa. El tipo de presa en este proyecto corresponde a una estructura de arcos múltiples, cuyo comportamiento resultan en una combinación de presas de arco y presas de contrafuertes. La selección de la instrumentación estará basada en obtener mediciones que permitan la verificación de los parámetros asumidos en el diseño y un monitoreo continuo del comportamiento general de la estructura. En este tipo de presa los parámetros que tiene una mayor influencia en el adecuado desempeño del sistema son los esfuerzos en el concreto, subpresión en la cimentación de la estructura y el efecto de rotación.

a. Verificación de los parámetros de diseño.

1) Temperatura. El control de la temperatura en la presa tendrá cierto impacto sobre el comportamiento de la misma, además de que permitirá calibrar muchos de los resultados obtenidos

Ilustración 61: Ubicación de termómetros



2) Subpresión. Este factor debe ser verificado en la base de la cimentación y en zonas permeables, que pudieran provocar variaciones de esfuerzos en la parte inferior de la cimentación, diferentes a aquellos asumidos en el diseño. Los instrumentos se deberán instalar a modo que proporcionen los perfiles de empuje que se están produciendo, y luego poder ser comparados con los valores asumidos. El empuje de la estructura será medido mediante la instalación de 3 piezómetros de sistema cerrado de cuerda vibrante y 3 piezómetros de sistema abierto o Casagrande, en pozos ubicados en la base de la presa. Este parámetro es de gran importancia en este tipo de presas.

Ilustración 62: Ubicación de piezómetros de sistema cerrado

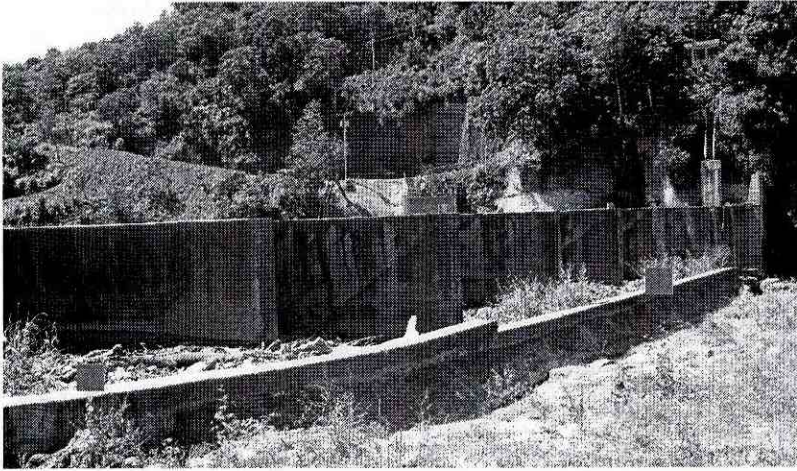
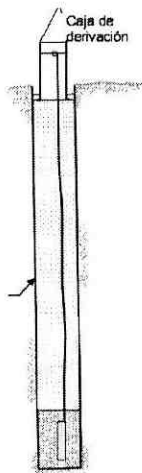
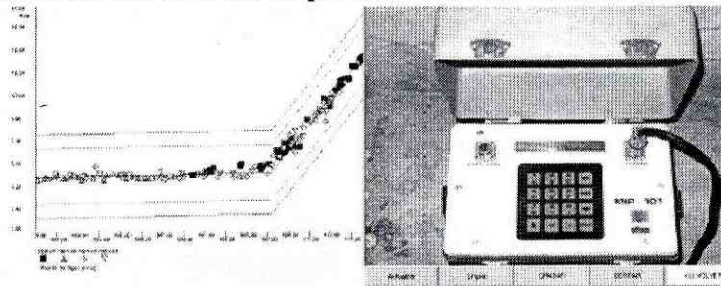


Ilustración 63: Instalación de piezómetros de sistema cerrado



Fuente: <http://www.cismid.uni.edu.pe>

Ilustración 64: Lectura de piezómetros de sistema cerrado



Fuente: www.spancold.es

Ilustración 65: Ubicación de piezómetros de sistema abierto

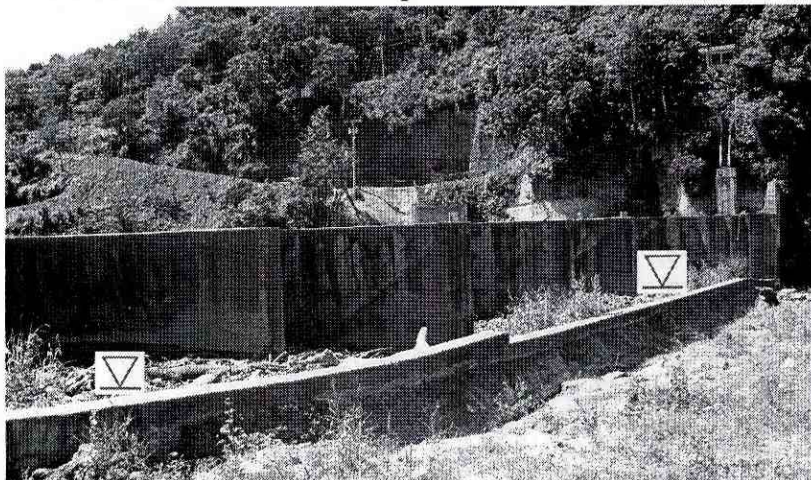
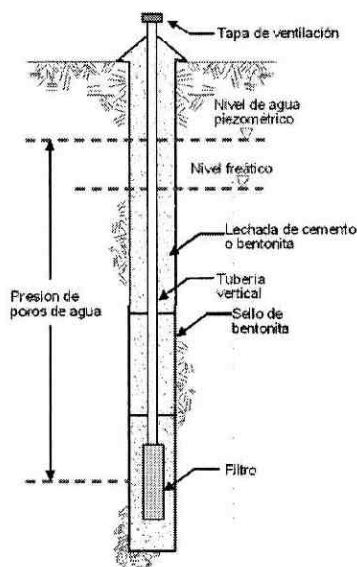


Ilustración 66: Instalación de piezómetros de sistema abierto



Fuente: <http://www.cismid.uni.edu.pe>

3) Esfuerzos en el concreto. La distribución de esfuerzos en la cimentación y en ciertos elementos de la presa tendrá un alto impacto en el desempeño de la estructura. Aguas abajo el esfuerzo es mayor, debido al impacto del agua, por lo que se requiere de un mayor control de la respuesta del material. El monitoreo de esfuerzos se completará mediante la instalación de 2 celdas de carga ubicadas dentro de la estructura y separadas a distancias promedio para cubrir la longitud total de la presa. Las lecturas de los instrumentos deberán ser calibrados mediante la utilización de termómetros ubicados en el mismo punto.

Ilustración 67: Ubicación de celdas de carga

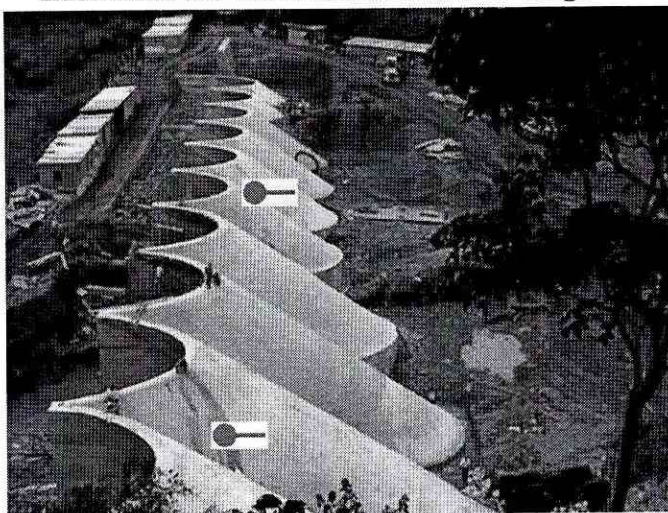
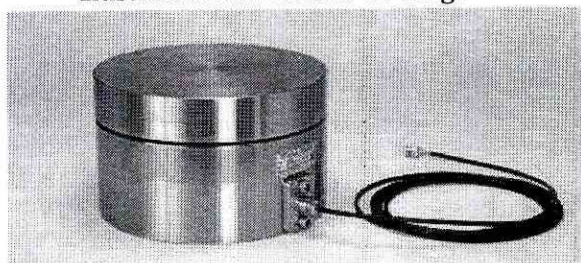


Ilustración 68: Celdas de carga

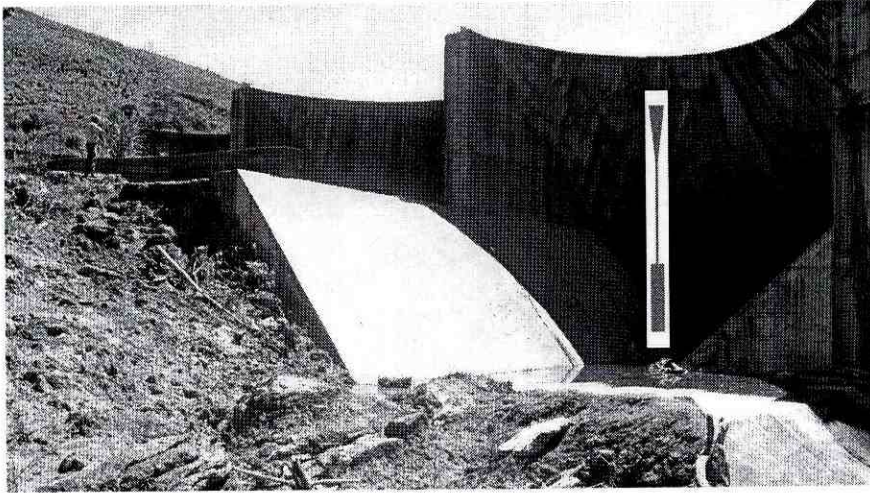
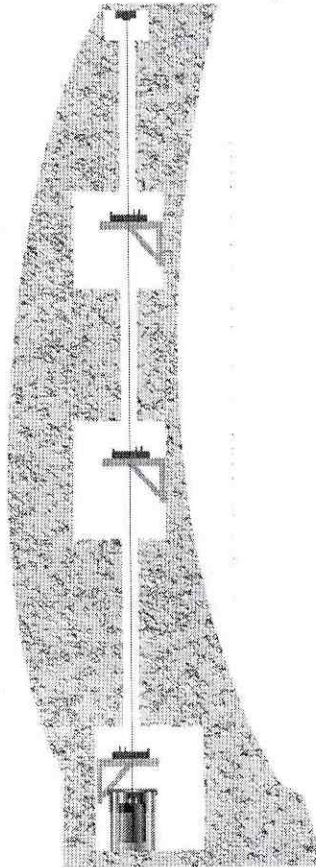


Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

b. Estudio del comportamiento de la estructura

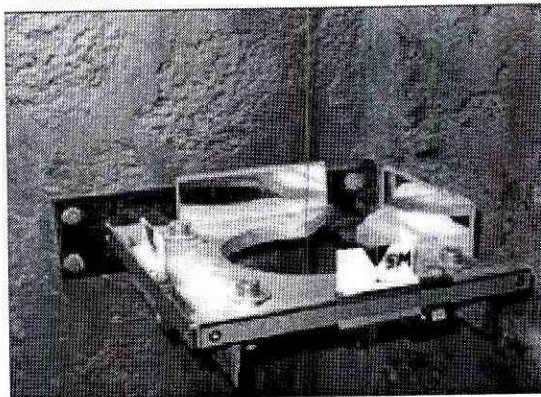
4) Deformación y desplazamiento horizontal. Los desplazamientos o deformaciones horizontales serán monitoreados en la parte superior de la presa, mediante la colocación de 2 péndulos directos, distribuidos a lo largo de la presa.

Así mismo, se colocarán extensómetros de cinta en forma horizontal en 5 de los arcos que forman parte de la presa.

Ilustración 69: Ubicación de péndulos**Ilustración 70: Instalación de péndulos**

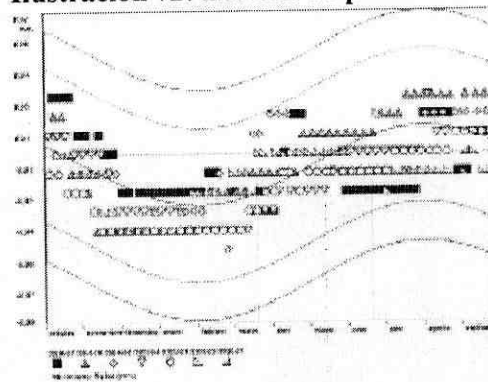
Fuente: <http://www.atinfo.net>

Ilustración 71: Instalación de péndulos



Fuente: www.spancold.es

Ilustración 72: Lectura de péndulos



Fuente: www.spancold.es

Ilustración 73: Ubicación de extensómetros de cinta

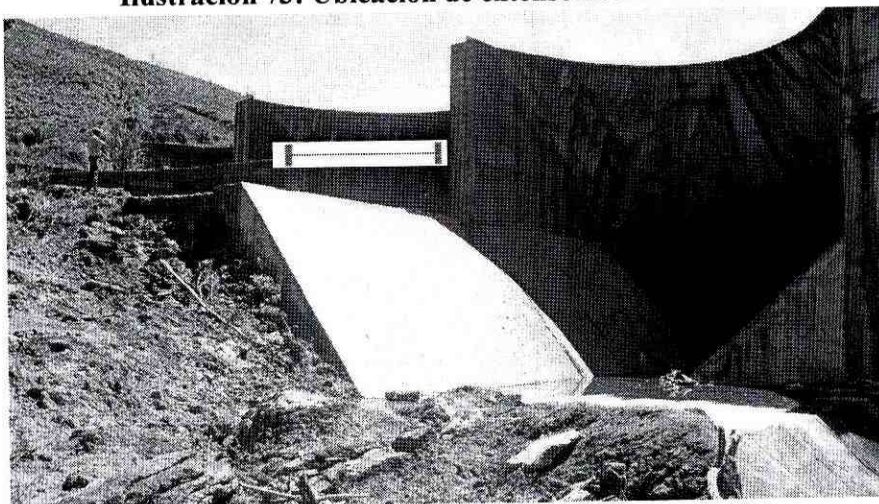
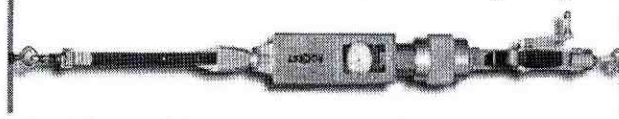


Ilustración 74: Extensómetros de cinta para presa



Fuente: "Geotechnical and Structural Instrumentatio Catalogue". RocTest, Telemac. New York, USA. 2001.

5) Deformación, desplazamiento vertical y asentamientos. Los desplazamientos verticales pueden ser monitoreados mediante la utilización de extensómetros de barra, colocados debajo de la estructura. Estos instrumentos permitirán detectar movimientos verticales y asentamientos mediante el monitoreo del suelo cercano a la cimentación. Se deberán colocar 3 extensómetros de barra a lo largo de la presa.

El control de la parte posterior de la presa es de gran importancia para estructuras de arcos múltiples, ya que son probables los deslizamientos o asentamientos. Se recomienda, además de los extensómetros mencionados, colocar 3 inclinómetros biaxiales en la parte posterior de la presa.

Ilustración 75: Ubicación de extensómetros de barra

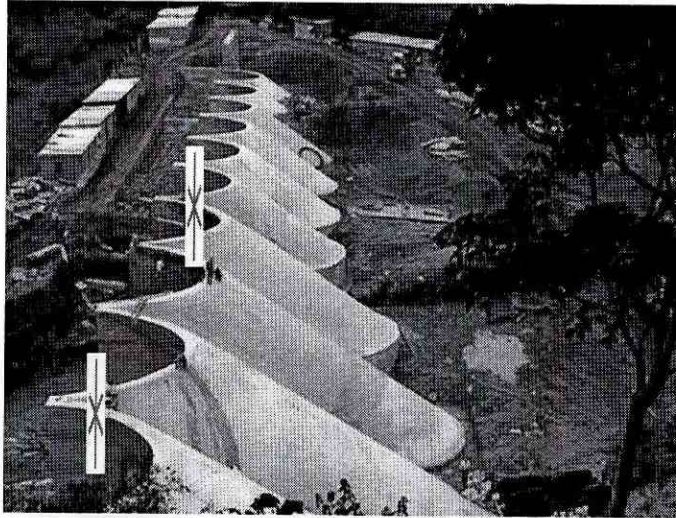
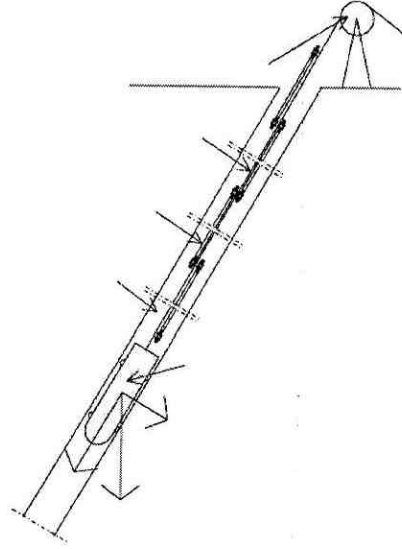


Ilustración 76: Instalación de extensómetros de barra



Fuente: www.smartec.ch

Ilustración 77: Ubicación de inclinómetros

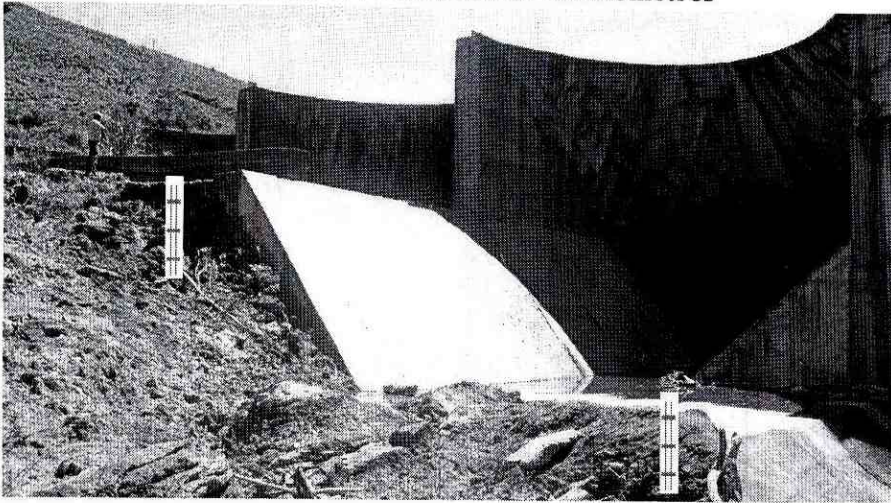
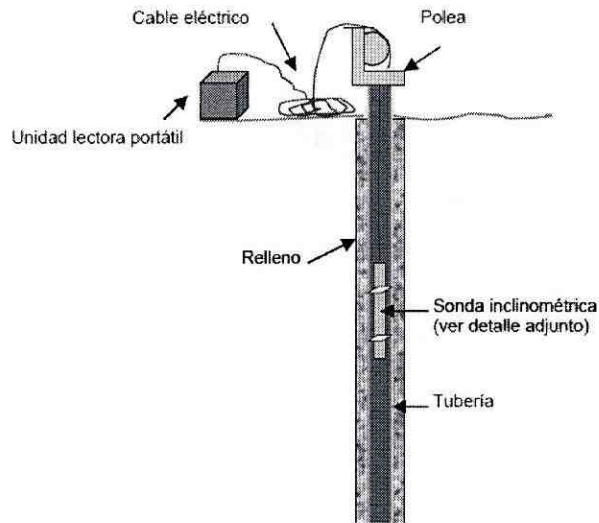
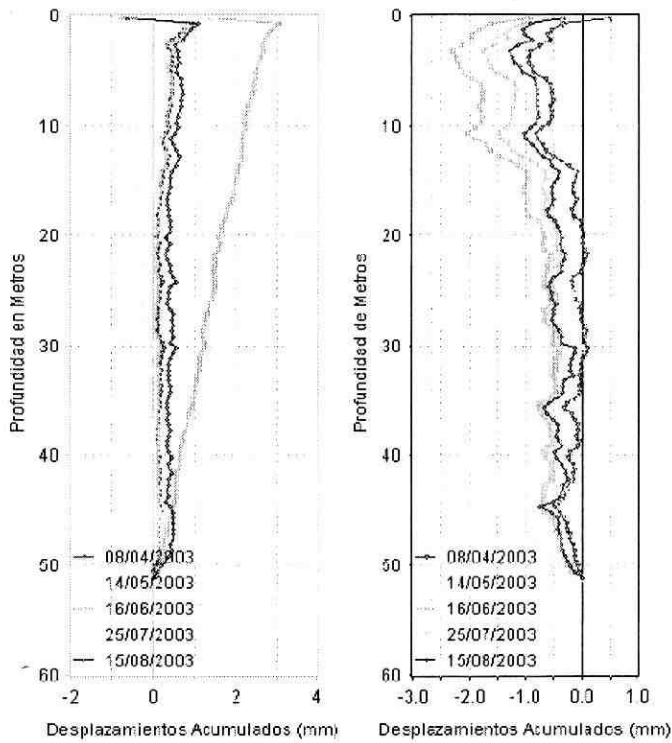


Ilustración 78: Instalación de inclinómetros



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

Ilustración 79: Lectura de inclinómetros



Fuente: <http://www.mop.gob.sv/archivo/uidv/documentos/taludes/inclino.pdf>

6) Medición de juntas y grietas. Se requiere la instalación de instrumentos para el monitoreo de juntas en el concreto. Se recomienda la utilización de 5 medidores de juntas.

Ilustración 80: Ubicación de medidores de juntas

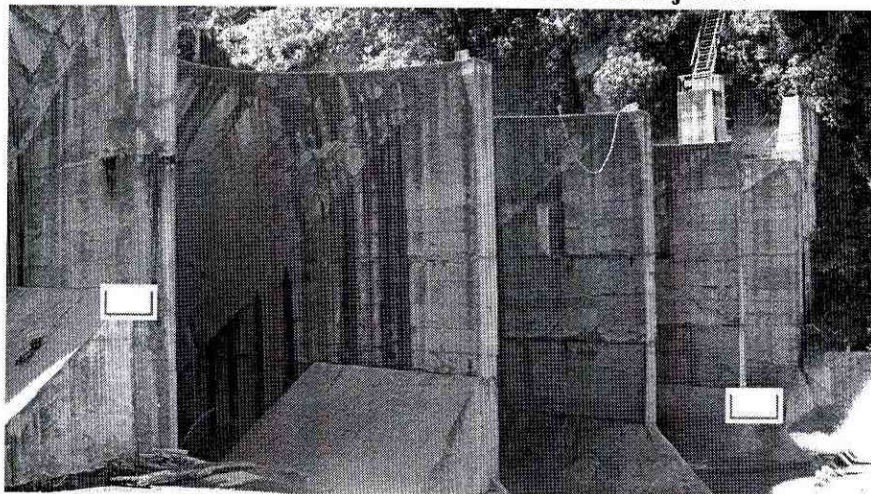
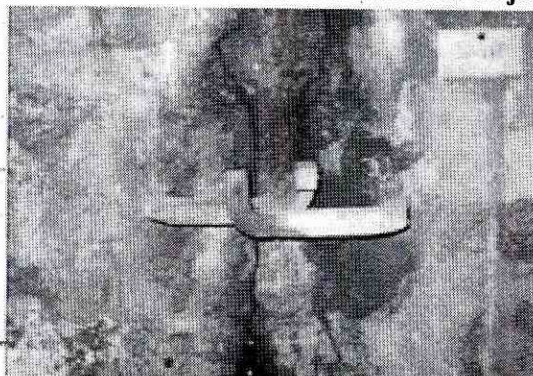
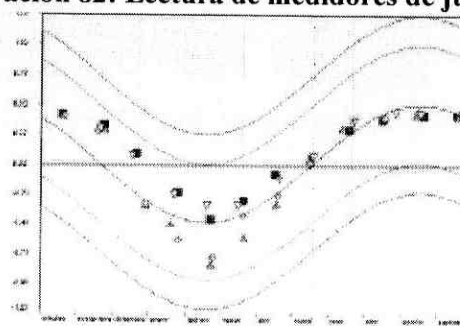


Ilustración 81: Instalación de medidores de juntas



Fuente: www.spancold.es

Ilustración 82: Lectura de medidores de juntas



Fuente: www.spancold.es

2. Túnel:

a. **Movimientos relativos.** Una disminución o aumento en la distancia relativa entre dos puntos fijos dentro del túnel indica un acercamiento o distanciamiento de los dos puntos, y por lo tanto una deformación. Para esto se instalarán extensómetros de cinta de forma horizontal, con una separación de entre 300 y 500m y atravesando el túnel. Esto permitirá detectar deformaciones que se encuentran fuera de los límites de diseño o movimientos de la estructura.

Ilustración 83: Túnel y ubicación de extensómetros.



3. Canal:

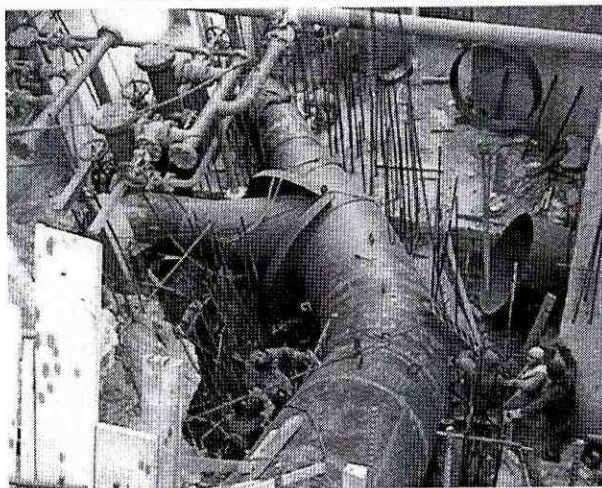
Ilustración 84: Canal



a. **Movimientos relativos.** Al igual que en el túnel, es de gran importancia el control de los movimiento relativos en el canal, por lo que se colocarán extensómetros con una separación de entre 300 y 500 metros a lo largo del canal.

4. Tubería forzada.

Ilustración 85: Tubería forzada



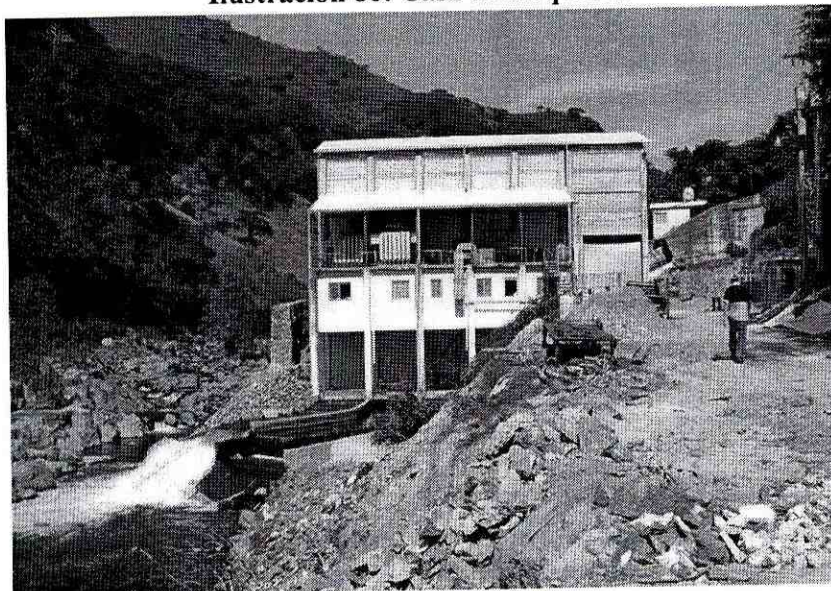
a. **Monitoreo de bases de apoyo.** Se recomienda la utilización de instrumentos para el control de asentamientos y movimientos en las bases sobre las que estará apoyada la estructura. Para cumplir con este objetivo, se deberán instalar inclinómetros en puntos cercanos de cada una de las bases.

b. **Medición de juntas y grietas.** Se requiere la instalación de medidores de juntas, juntas ubicadas en áreas donde se considere que las presiones serán mayores en base a la velocidad del agua, área transversal de la sección, ubicación, comportamiento esperado, etc.

c. **Temperatura.** El control de la temperatura en la tubería permitirá determinar si se está trabajando dentro de los límites permisibles según las propiedades del material. Para esto, un termómetro cada 300 o 500m será suficiente.

5. Casa de máquinas.

Ilustración 86: Casa de máquinas



a. Medición de juntas y grietas. Se recomienda la instalación de medidores de juntas en los puntos necesarios. Se recomienda la utilización de al menos 2 medidores de juntas.

b. Temperatura. Se recomienda la instalación de termómetros en diversos puntos de la casa de máquinas debido a las altas temperaturas que pueden generarse por el funcionamiento de las máquinas y que por lo tanto, podrían afectar el buen funcionamiento del sistema. Se instalarán 2 termómetros de resistencia.

c. Sismógrafo. Las condiciones sísmicas del país requieren la instalación de instrumentos que detecten eventos que puedan castigar las capacidades estructurales de cualquier estructura. En este caso será suficiente la instalación de 1 sismógrafo en un área en la que no existen mayores vibraciones debido al funcionamiento normal de los equipos. Además, el sismógrafo podrá alertar de movimientos extremos, como consecuencia de fallas en los sistemas.

IX. CONCLUSIONES

- Debido a los peligros que pueden derivarse del mal funcionamiento de un proyecto hidroeléctrico debido a su gran envergadura, se han implementado normas y se ha incrementado la disponibilidad de instrumentación destinada para el monitoreo de determinados parámetros estructurales. De este modo, el monitoreo de dichos parámetros es una medida que garantizará la seguridad de este tipo de estructuras y previene la posibilidad de fallas en los sistemas.
- Los sistemas de auscultación permiten conocer el conjunto de esfuerzos que actúan sobre la estructura, y la respuesta y comportamiento de las distintas partes frente a dichos esfuerzos. La interpretación del comportamiento de la estructura estará basado en el monitoreo de posibles movimientos, filtraciones, presiones, deformaciones, esfuerzos, etc.
- Los instrumentos geotécnicos para la auscultación de proyectos hidroeléctricos, tienen como función principal detectar anomalías en el comportamiento, identificar peligros y evitar posibles fallas que pueden ocurrir inclusive durante la construcción. La selección del tipo de instrumentación, de su ubicación y cantidad, dependerá de las condiciones a las que estará expuesto, las circunstancias del proyecto, los parámetros de interés, la precisión y exactitud requerida en los resultados, el elemento monitoreado y las condiciones económicas. Así mismo, es necesario contar con personal capacitado para realizar la instalación, calibración y lectura de los instrumentos.
- La auscultación de proyectos hidroeléctricos permite tener un mayor conocimiento y control del comportamiento de la obra en todo momento y reducir posibles errores en parámetros estimados para el diseño previsto. Los modelos de cálculo pueden obviar condiciones y variaciones de comportamiento propias de cada proyecto y de las condiciones a las cuales estará expuesto.
- El correcto análisis e interpretación de los resultados obtenidos mediante los instrumentos instalados en la obra, es de vital importancia para garantizar una mayor precisión y exactitud en la determinación de modelos de comportamiento.
- La falta de información sobre el comportamiento real de una estructura, resulta en diseños altamente conservadores y poco económicos. La auscultación de proyectos hidroeléctricos permite el ajuste y mejoras en las técnicas de cálculo y diseño, y una mayor precisión en los parámetros utilizados para dicho diseño, con el fin de proporcionar modelos económicamente factibles.
- La Comisión Nacional de Energía Eléctrica ha implementado normas de seguridad para presas con el objetivo de prevenir daños tanto de la estructura monitoreada, como de estructuras adyacentes y poblaciones vecinas. Sin embargo, la aplicación de programas de auscultación es limitado en nuestro país, y aún requiere de programas de impulso y documentos de apoyo. Esta guía proporciona los lineamientos y procedimientos básicos para la auscultación de proyectos hidroeléctricos, siendo un instrumento de gran importancia para el apoyo de las normas establecidas para los controles de seguridad en las presas de Guatemala.

X. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la utilización de esta guía como base para la implantación de programas de auscultación en proyectos hidroeléctricos. Esta guía proporciona las bases de la auscultación de proyectos hidroeléctricos para la determinación de los parámetros de interés y la apropiada selección y utilización de los diversos tipos de instrumentos disponibles.
- Es necesario realizar una planificación antes de seleccionar el tipo, cantidad y ubicación de los instrumentos de monitoreo. Para esto se deberá investigar sobre el sitio, los objetivos y usos del proyecto, las condiciones ambientales, la ubicación, la capacidad de embalse, las dimensiones del proyecto y de los distintos elementos que lo componen, la probabilidad de riesgo, la zona sísmica y otros parámetros que puedan ser relevantes para la determinación del tipo de auscultación requerido.
- Para lograr un buen proyecto de monitoreo, los instrumentos deben ser simples, consistentes en su funcionamiento, sólidos, confiables, durables en condiciones ambientales y económicamente aceptables.
- Para garantizar datos precisos y confiables, es necesario una adecuada instalación, la utilización de instrumentos de calidad y en buen estado, un adecuado manejo y organización de la información, disponer de métodos de cálculo adecuados, y una correcta y rápida interpretación de resultados.
- Se recomienda considerar los factores y circunstancias que podrán afectar el comportamiento de la estructura, para poder determinar el sistema de lectura más adecuado para cada tipo de instrumento. El sistema de lectura automática de datos, permitirá obtener resultados homogéneos y con mayor precisión. Las lecturas manuales por lo general poseen un mayor margen de error debido a la intervención del personal en este proceso. Así mismo, los sistemas de lectura automática deberán utilizarse en condiciones que representen peligro para la realización de lecturas manuales.
- Es de gran importancia realizar inspecciones visuales periódicamente en los alrededores de la obra para un control adicional de los datos obtenidos mediante los instrumentos de auscultación, y de este modo contar con un respaldo para la interpretación de resultados que puedan resultar confusos, inadvertidos o poco racionales.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Vallarino Cánovas del Castillo, Eugenio. 2006. *Tratado básico de presas*. 6ª ed. Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 797 págs.
- Santos Mora, Antonio. 1993. *Replanteo y control de presas de embalse*. 2ª ed. España, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de España. 387 págs.
- García, Diego. 1994. *Presas Antiguas de Extremadura*. Londres, Fundación Juanelo Turriano. 238 págs.
- Seguridad de Presas*. 2005. Centro Español de Grandes Presas. España. 247 págs.
- Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas*. 2003. Centro Español de Grandes Presas. España. 193 págs.
- Díaz Cascón-Sagrado, Joaquín; Bueno Hernández, Francisco. 2001. *Ingeniería de Presas*. España, Servicios de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 497 págs.
- Píriz Mira, Guillermo; García de Prado, Jerónimo; Rodríguez Cid, Laura. 2002. «Tipología de Presas. Métodos de Auscultación» *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*. [Universitario de Mérida; Universidad de Extremadura].
- Geotechnical and Structural Instrumentation Catalogue*. 2001. RocTest, Telemac. New York, USA.
- Normas de Seguridad de Presas*. 1999. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Guatemala. 58 págs.
- Guía para la Elaboración de los Planes de Emergencia de Presas*. 2001. Ministerio de Medio Ambiente. España. 163 págs.
- Dunnicliff, John; Green, Gordon E. 1988. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. New York, Wiley-Interscience Publication. 577 págs.
- Castro, Pablo Castro; Rebagliati, Horacio. 2008. *Modificaciones al Sistema de Auscultación Hidroeléctrica Piedra del Águila*. Argentina, Comité Argentino de Presas. 17 páginas.
- Blanco Urrutia, Fidel Antonio; Alvarenga, Edwin Ricardo. 2003. *Monitoreo Inclinométrico de Taludes*. El Salvador, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.
- Manual para el Monitoreo de Presas, Instrumentación y Telemetría*. 2005. Applied Geomechanics. México D.F. 89 págs.

Geotechnical, Geophysical, Groundwater and Structural Instrumentation, Slope Indicator Brochures. 2004. Slope Indicator Company. USA. 45 págs.

Creager, William; Justin, Joel; Hinds, Julian. 1995. *Engineering for dams*. New York, Wiley. Volume 3. 929 págs.

Marsal, Raúl; Reséndiz Núñez, Daniel. 1983. *Presas de tierra y enrocamiento*. México, Limusa. 546 págs.

Golzé, Alfred R. 1977. *Handbook of dam engineering*. New York, Van Nostrand Reinhold. 793 págs.

Kulhawy, Fred H. 1981. *Recent developments in geotechnical engineering for hydro projects*. New York, American Society of Civil Engineers. 247 págs.

García Agustín, José. 1932. «Comparación de tipos de presas». *Revista de Obras Públicas [España]*. 80 págs.

Pérez Sáiz, Ángel. 1973. «Auscultación de presas de materiales sueltos». *Revista de Obras Públicas [España]*. 120 págs.

Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presa. 1967. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hidráulicas. España. 186 págs.

Cardona, José Hoyos; Iral, William de Jesús. 1994. *Instrumentación de presas en tierra*. Tesis Universidad Nacional. 129 págs.

Fonseca Herrera, Nestor Enrique. 1991. «La instrumentación en la operación y seguridad de las presas». *Revista Escuela colombiana de ingeniería [Colombia]*. 45 págs.

Flores Berrones, Raul. 2001. *Geotecnia en la Ingeniería de Presa*. México, IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 587 págs.

Gonzales de Vallejo, Luis. 2004. *Ingeniería Geológica*. España, Editores Pearson Prentice Hall. 744 págs.

XII. APÉNDICES

A. Indicadores cualitativos, sus orígenes y efectos

1. Presas de fábrica

Cuadro 15: Indicadores cualitativos en presas de fábrica

Grupo	Indicador	Posibles orígenes	Posibles efectos
Apariencia superficial	Fisuración general superficial	<ul style="list-style-type: none"> - Reacciones químicas - Ataque por sulfatos - Lavado del concreto - Envejecimiento del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro acelerado - Reducción de los esfuerzos admisible - Reducción de los esfuerzos efectivos - Incremento de esfuerzos - Pérdida de peso - Incremento de filtraciones
	Fisuración local superficial	<ul style="list-style-type: none"> - Concentración de esfuerzos - Movimientos diferenciales 	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro progresivo - Incremento de filtraciones - Pérdida de sección - Concentración de esfuerzos
	Agrietamiento profundo	<ul style="list-style-type: none"> - Cargas imprevistas - Sobreesfuerzos - Subpresiones elevadas - Retracción del concreto - Expansión del concreto - Movimientos del cimiento - Sismos - Pérdida de resistencia - Efectos térmicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de filtraciones - Deterioro acelerado - Fisuración progresiva - Redistribución de esfuerzos - Reducción de la estabilidad - Movimientos diferenciales
Filtraciones	Humedad superficial en parámetros	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Deterioro del concreto - Porosidad del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro rápido - Lavado de concreto - Pérdida de peso - Pérdida de resistencia - Incremento de infiltraciones
	Filtraciones concentradas a través de la presa	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Movimientos diferenciales - Apertura de juntas - Subpresión importante - Fugas en tuberías y conductos - Cegado de drenes - Erosión del concreto - Lavado del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida del esqueleto sólido - Pérdida de la integridad estructural - Incremento de subpresiones

Continuación Cuadro 15.

Grupo	Indicador	Posibles causas	Posibles efectos
Filtraciones	Modificación en el caudal a través de la presa	<ul style="list-style-type: none"> - Autosellado de grietas - Cegado de drenes - Rotura de drenes - Movimientos diferenciales - Fractura del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de subpresiones - Pérdida de mortero - Redistribución de esfuerzos
	Modificaciones en el caudal a través del cimientto Filtraciones a través del cimientto	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro del cimientto - Drenaje inadecuado del cimientto - Apertura de juntas, grietas, fallas - Asientos diferenciales en el cimientto - Elementos de impermeabilización inadecuado - Reapertura de cavidades 	<ul style="list-style-type: none"> - Reblandecimiento del cimientto - Rotura del cimientto - Erosión interna del cimientto - Incremento de subpresiones - Pérdida de la capacidad portante del cimientto - Movimientos en la presa - Pérdida de capacidad del embalse - Colapso del cimientto
Movimientos	Movimiento general de la presa	<ul style="list-style-type: none"> - Movimiento general del cimientto - Movimiento de los estribos - Sismos - Cargas imprevistas - Subpresiones elevadas - Expansión del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de las filtraciones - Inoperatividad de mecanismos - Fisuración severa - Redistribución de esfuerzos - Reducción de la estabilidad - Pérdida de resguardo - Pérdida de alineación de estructuras auxiliares - Rotura de estructuras auxiliares - Rotura de la pres
	Desarrollo de irregularidades superficiales	<ul style="list-style-type: none"> - Movimiento general del cimientto - Movimiento de los estribos - Sismos - Cargas imprevistas 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de la fisuración - Incremento de filtraciones - Trabado de compuertas
	Levantamiento del cimientto Pérdida de alineación en coronación	<ul style="list-style-type: none"> - Asientos de consolidación - Colapso de cavidades - Licuefacción del cimientto - Sismos Deformabilidad elevada del cimientto - Resistencia insuficiente del cimientto 	<ul style="list-style-type: none"> - Movimientos de la presa - Pérdida de alineación de estructuras auxiliares - Rotura de estructuras auxiliares

2. Presas de materiales sueltos

Cuadro 16: Indicadores cualitativos en Presas de Materiales Sueltos

Grupo	Indicador	Posibles orígenes	Posibles efectos
Apariencia superficial	Desorganización de las protecciones del talud	<ul style="list-style-type: none"> - Peso insuficiente del material utilizado - Desintegración del material - Graduación inadecuada en el material - Obstrucción de los drenes o filtros - Ubicación inadecuada de los drenajes 	<ul style="list-style-type: none"> - Acarcavaiento profundo - Reducción de la sección resistente
	Filtraciones	Filtraciones a través de la presa Humedades no habituales Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje interno insuficiente - Elemento impermeable inadecuado - Material inadecuado - Material no homogéneo en vertical - Compactación inadecuada - Obstrucción de drenes o filtros - Biointrusión - Acarcavamiento superficial - Nivel freático en superficie - Saturación temporal - Precipitación intensa - Nivel de agua alto agua abajo - Filtración en relación con los conductos
Filtraciones a través del cimiento Terreno inusualmente blando		<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro del cimiento - Elemento de impermeabilización inadecuado - Reapertura de cavidades - Asientos diferenciales - Fractura del cimiento - Apertura de juntas, grietas, fallas 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión interna del cimiento - Pérdida de capacidad portante del cimiento - Colapso del cimiento - Pérdida de capacidad de embalse - Rotura del cimiento - Movimientos en la presa - Reblandecimiento

Continuación Cuadro 16.

Grupo	Afectación	Factores naturales	Factores artificiales
Movimientos	<p>Grietas longitudinales en el talud</p> <p>Grietas curvas en el talud</p> <p>Irregularidades en el talud</p> <p>Abobamiento del talud</p> <p>Hundimientos en coronación</p> <p>Pérdida de alineación en coronación</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia insuficiente en el cuerpo de la presa - Taludes con demasiada pendiente - Nivel freático demasiado alto - Asientos diferenciales - Movimientos del cimiento - Sismo - Desembalse rápido - Descenso rápido del nivel de aguas abajo - Erosión del pie - Precipitaciones intensas - Nivel alto aguas abajo - Saturación temporal - Pudrición de materia orgánica 	<ul style="list-style-type: none"> - Rotura de la presa - Daños de estructuras auxiliares - Pérdida de la capacidad de embalse
	<p>Hundimiento en el material de la presa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje interno insuficiente - Elemento impermeable inadecuado - Material inadecuado - Material no homogéneo en vertical - Compactación inadecuada - Obstrucción de drenes o filtros - Biointrusión - Nivel freático en superficie - Saturación temporal - Precipitaciones intensas - Nivel de agua alto aguas abajo - Filtración en relación con los conductos 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión interna de la presa - Exceso de presiones intersticiales - Subpresión en las estructuras auxiliares - Daños a las estructuras auxiliares - Pérdida de la capacidad de embalse
	<p>Levantamiento del cimiento</p> <p>Grietas longitudinales en el talud</p> <p>Grietas transversales en el talud</p> <p>Hundimientos en coronación</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Asientos de consolidación - Colapso de cavidades - Licuefacción del cimiento - Sismos Deformabilidad elevada del cimiento - Resistencia insuficiente del cimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión interna de la presa - Movimientos de la presa - Pérdida de alineación de estructuras auxiliares - Rotura de estructuras auxiliares - Pérdida de resguardo - Hundimientos en coronación

3. Estructuras auxiliares

Cuadro 17: Indicadores cualitativos en estructuras auxiliares

Código	Indicador	Posibles causas	Posibles efectos
Apariencia	Erosión del aliviadero	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales inadecuados en aliviadero - Uso excesivamente frecuente del aliviadero - Defecto del proyecto - Falta de mantenimiento - Avenida superior a las previstas 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo general del aliviadero - Afección a la presa - Afección a las laderas
	Rotura de losas del aliviadero Rotura de cajeros del aliviadero	<ul style="list-style-type: none"> - Falta o insuficiencia de drenaje - Erosión interna bajo el aliviadero 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo general del aliviadero - Erosión del aliviadero
	Obstrucción de la embocadura	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones inadecuadas o ausencia de rejas - Carga de aterramiento o flotantes no prevista - Vandalismo 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de capacidad de desagüe - Fallo general del desagüe - Rebosamiento
	Accesibilidad a la sala de mecanismos	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo de proyecto - Sobrecarga de uso excesiva - Movimiento de pilas - Inestabilidad de la torre - Inundación de accesos 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de control de las compuertas - Imposibilidad de vaciado - Rebosamiento - Pérdida de capacidad de desagüe
	Indicadores de actos de vandalismo	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de control de accesos - Abandono de las instalaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Rotura de válvulas o compuertas

Continuación Cuadro 17.

Grupo	Indicador	Presillas inferiores	Presillas superiores
Filtraciones	<p>Filtraciones en el pie del aliviadero Depósito de finos en el pie del aliviadero Filtraciones a la salida del conducto Depósito de finos a la salida de conductos Deformaciones del conducto Separación entre conductos y relleno en la salida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo o insuficiencia de drenaje - Erosión interna bajo el aliviadero - Fallos de alineación - Mala colocación - Asientos - Juntas inadecuadas - Cimiento inadecuado - Compactación inadecuada - Corrosión - Erosión - Subpresión - Vibraciones - Falta de control aguas arriba - Fugas de agua desde el conducto 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo general del aliviadero - Erosión del aliviadero - Erosión interna en la presa - Movimientos en la presa - Pérdida de capacidad de embalse - Inutilización de los conductos
Movimientos	<p>Movimiento vertical en las juntas del aliviadero Movimiento lateral o giro de cajeros del aliviadero Pérdida de alineación de losas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Falta o insuficiencia de drenaje - Erosión interna bajo el aliviadero 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo general del aliviadero - Erosión del aliviadero
	Indicadores típicos de presa de fábrica	- Ver causas en presa de fábrica	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo general del aliviadero - Pérdida de capacidad del aliviadero - Rotura de soportes de compuertas
Válvulas y compuertas	<p>No operatividad de válvulas y compuertas Fallo en pruebas de funcionamiento de mecanismos Indicadores visuales obvios de mecanismos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Asientos - Corrosión - Fallos en las alineaciones - Vandalismo - Fallo de elementos de mecanismos - Depósitos - Bloqueo de mecanismos - Acumulación de flotantes - Movimientos diferenciales 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de control de las sueltas - Imposibilidad de vaciado - No operatividad de desagües - Pérdida de capacidad de desagüe - Rebosamiento

4. Embalse

Cuadro 18: Indicadores cualitativos en el embalse

Grupo	Indicador	Posibles causas	Posibles efectos
Apariencia	Agrietamientos en la ladera	<ul style="list-style-type: none"> - Factores geológicos - Sismos - Precipitaciones intensas - Oscilaciones de embalse 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamiento de laderas del embalse - Daños a los conductos - Daños al aliviadero
Movimientos	Deslizamientos de laderas de embalse	<ul style="list-style-type: none"> - Factores geológicos - Saturación - Alta escorrentía - Inundación - Precipitaciones intensas - Sismos - Oscilación de embalse 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran oleaje - Rebosamiento - Aterramiento - Bloqueo de desagües - Incremento de cargas - Pérdida de volúmenes de embalse
	Aterramiento del embalse	<ul style="list-style-type: none"> - Actuaciones en la cuenca 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de cargas - Reducción de la estabilidad - Obstrucción de desagües - Pérdida de volúmenes de embalse
Otros	Oleaje en el embalse	<ul style="list-style-type: none"> - Viento - Deslizamiento en el embalse 	<ul style="list-style-type: none"> - Rebosamiento - Daños a los equipos - Erosión de estribos y cimientó
	Material flotante en el embalse	<ul style="list-style-type: none"> - Avenidas - Precipitaciones intensas - Actuaciones en la cuenca 	<ul style="list-style-type: none"> - Obstrucción del aliviadero - Obstrucción de los desagües - Daños a rejillas, equipos y mecanismos
	Balance con pérdidas de volumen embalsado	<ul style="list-style-type: none"> - Factores geológicos - Precipitaciones intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de funcionalidad del embalse - Erosión intensa

5. Zonas aguas abajo

Cuadro 19: Indicadores cualitativos en zonas aguas abajo

Grupo	Indicador	Pasivos a aguas	Pasivos a aguas
Apariencia	Erosiones aguas abajo	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad insuficiente del cauce - Concentración de caudales de fugas - Concentración de caudales de desagüe - Falta de protección contra la erosión - Fallo en el dissipador de energía - Erosión interna - Filtración excesiva - Erosión ambiental - Rebosamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de cimiento - Pérdida de estabilidad - Rotura de elementos auxiliares
Filtraciones	Aparición de fuentes Modificación del caudal en fuentes Humedades en laderas Filtraciones aguas abajo	<ul style="list-style-type: none"> - Factores geológicos - Precipitaciones intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de funcionalidad del embalse - Erosión intensa

B. Posibles medidas en situaciones de emergencia

Cuadro 20: Posibles medidas en situaciones de emergencia

Situación o fenómeno	Medidas
Rebosamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión conjunta de los embalses de la cuenca - Incremento del caudal desaguado - Desvío de las aguas de entrada al embalse - Bombeo, instalaciones de sifones, brecha controlada, etc. - Protección de las zonas de impacto del vertido (sacos, escollera, terreros) - Elevación de la coronación (sacos, terreros, etc.) - Protección del talud agua abajo (plásticos, escollera, etc.)
Vertido sobre compuertas no adaptadas para ello	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de caudal desaguado - Desvío de las aguas de entrada al embalse - Voladura controlada de compuertas - Bombeo, instalaciones de sifones, brecha controlada, etc.
Sismos	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección inmediata - Descenso del nivel de embalse - Corrección de daños estructurales
Precipitaciones intensas	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección inmediata - Protección del talud agua abajo (plásticos, escollera, etc.)
Deslizamiento de laderas	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección inmediata - Descenso del nivel de embalse - Corrección y estabilización de laderas
Vandalismo	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección inmediata - Descenso del nivel de embalse
Agrietamiento en presas de fábrica	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Medidas adicionales de inspección y auscultación - Descenso del nivel de embalse - Sellado e inyección de grietas - Impermeabilización del material aguas arriba (membranas, plásticos, etc.) - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Filtraciones en presas de fábrica	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Taponado del origen de la filtración - Sellado e inyección de grietas - Impermeabilización del material aguas arriba (membranas, plásticos, etc.) - Operación a niveles inferiores - Gran reparación

Continuación Cuadro 20.

Situación o fenómeno	Medidas
Movimientos en presas de fábrica	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Elevación de la coronación (sacos, terreros, etc.) - Sellado e inyección de grietas - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Fallos en taludes en presas de materiales sueltos	<ul style="list-style-type: none"> - Descenso del nivel de embalse - Protección del talud (escollera, sacos, terreros, etc.) - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Filtraciones en presas de materiales sueltos	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Taponado del origen de la filtración - Taponado de la salida de la filtración (arena, gravas, etc.) - Impermeabilización del material agua arriba (membranas, plásticos, etc.) - Pozos o zanjas drenantes en el pie - Subida artificial del nivel del agua aguas abajo - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Movimientos en presas de materiales sueltos	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Elevación de la coronación (sacos, terreros, etc.) - Carga del pie aguas abajo (relleno, etc.) - Pozos o zanjas drenantes en el pie - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Movimientos del cimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Elevación de la coronación (sacos, terreros, etc.) - Carga del pie aguas abajo (relleno, etc.) - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Filtraciones a través del cimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Taponado del origen de la filtración - Taponado de la salida de la filtración (arena, gravas, etc.) - Operación a niveles inferiores - Gran reparación

Continuación Cuadro 20.

Situación o fenómeno	Medidas
Fallos en el aliviadero	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Descenso del nivel de embalse - Desvío de las aguas de entrada al embalse - Protección temporal del aliviadero - Clausura provisional del elemento - Operación a niveles inferiores - Gran reparación
Fallas en el desagüe de fondo	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección y control intensivos - Bombeo, instalaciones de sifones, brecha controlada, etc. - Elevación de la coronación (sacos, terreros, etc.) - Clausura provisional del elemento - Operación a niveles inferiores - Gran reparación

C. Clasificación del proyecto hidroeléctrico en función del riesgo potencial

Cuadro 21: Clasificación del proyecto hidroeléctrico en función del riesgo potencial

Riesgo	Descripción
Muy alto	<ul style="list-style-type: none"> - Múltiple pérdida de vidas. - El área de crecida (área que podría ser inundada si hay falla en la presa) incluye comunidades, áreas comerciales y de trabajo, principales carreteras, etc. - Pérdidas económicas muy altas que afectan la infraestructura y los servicios públicos. - Destrucción o daño sobre grandes áreas residenciales, terrenos para usos comerciales, carreteras, tuberías y otros servicios. - Pérdida o deterioro significativo de importantes hábitats, especies en peligro, paisajes únicos o sitios de significancia cultural. - La factibilidad para la restauración es baja.
Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Mediano potencial de pérdida de vidas. - El área de crecida incluye carreteras, áreas comerciales, de trabajo y residencias espaciadas. - Pérdidas económicas sustanciales que afectan infraestructuras y servicios públicos. - Incluye la destrucción o daño a terrenos con usos residenciales, comerciales, carreteras, tuberías, otros servicios. - Pérdida o deterioro significativo de importantes hábitats, especies en peligro, paisajes únicos o sitios de significancia cultural. - La factibilidad para la restauración es alta.
Bajo	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo potencial de múltiple pérdida de vidas. - El área de crecida no es desarrollada a excepción de en caminos menores, fincas no residenciales y actividades rurales. - Bajas pérdidas económicas limitada. - Pérdida o deterioro significativo de importantes hábitats, especies en peligro, paisajes únicos o sitios de significancia cultural. - La factibilidad para la restauración es alta. Incluye las situaciones donde la recuperación ocurriría con el tiempo sin restauración.