



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO DE LA CORTINA DEL
P. H. EL CAJÓN DURANTE EL PRIMER
LLENADO**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:
VALENTIN MORALES CEBADA**

DIRECTOR: M. EN I. REGINALDO JOSE HERNANDEZ ROMERO



MEXICO, D. F.

2007

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Renato H. de la Mora Ochoa y Flora Cebada López, por que es gracias a ellos que he podido terminar una carrera y he tenido la oportunidad de estudiar, gracias por su apoyo y enseñanzas que me han servido para enfrentar la vida y los retos que me he propuesto

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y a sus profesores, por formarme como profesionista, por la educación que me han brindado y la oportunidad de conocer amigos y profesores; siempre será un orgullo poder decir *“POR MI PATRIA HABLARÁ EL ESPÍRITU”*

A mis hermanos Alicia, Fabiola y Jesús y a mi novia Vianey, por apoyarme siempre en mis proyectos aún cuando las cosas parecieran muy difíciles, por darme confianza, seguridad y fuerza para seguir adelante

Al M. en I. Reginaldo J. Hernández Romero, por orientarme y auxiliarme en esta última etapa de mis estudios profesionales, y muy en especial por dirigir esta Tesis, no solo como profesor sino como amigo

A la Subgerencia de Seguridad de Estructuras de la Comisión Federal de Electricidad, en especial a los Ingenieros Luis E. Chávez Ramírez, Ma. Guadalupe Barrios Galván y Erick Torres Bonilla, por facilitarme información indispensable para la realización de este trabajo y por apoyar esta Tesis de manera incondicional

A mis amigos, por brindarme su amistad, por apoyarme y por acompañarme durante mi carrera



Deformaciones de la cortina del P. H. El Cajón durante el primer llenado

ALCANCES	3
INTRODUCCIÓN.....	4
I. ANTECEDENTES. COMPORTAMIENTO DE LA PRESA AGUAMILPA.	12
I.1. Generalidades de la presa Aguamilpa.	12
I.1.1. Datos de Diseño.	12
I.1.2. Descripción de la obra de Contención.	13
I.2. Instrumentación instalada.	15
I.2.1. Cuerpo de la cortina.	16
I.2.2. Cara de concreto.	17
I.3. Comportamiento durante el primer llenado.	18
I.3.1. Deformaciones de la presa.	18
I.3.1.1. Asentamientos.....	18
I.3.1.2. Desplazamientos horizontales.	23
I.3.1.3. Módulos de Deformación.	24
I.3.1.3.1 A partir de Niveles hidráulicos de asentamiento.....	25
I.3.1.3.1 A partir de Inclínómetros.	30
I.3.1.3.3 A partir de Grupos de celdas de presión y extensómetros.	32
I.3.2. Niveles de agua.....	40
I.3.2.1. Niveles piezométricos.	40
I.3.2.2. Filtraciones en la cortina.	41
I.3.3. Deformaciones en las losas de concreto.	42
I.3.3.1. Deformaciones medidas en referencias topográficas.....	42
I.3.3.2. Desplazamientos en juntas losa-plinto.....	43
I.3.3.3. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.	44
I.3.3.4. Desplazamientos normales a la cara de concreto.	46
II GENERALIDADES DEL P.H. EL CAJÓN	49
II.1. Datos Generales.....	49
II.1.1. Ubicación.....	49
II.1.2. Descripción de la obra de contención.	50
II.2. Aspectos del diseño de la cortina.....	52
II.3. Análisis de la propuesta	58
II.4. Instrumentación instalada.	59
II.4.1. Cuerpo de la cortina.	59
II.4.2. Cara de concreto.....	62
III. CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA EL CAJON.....	63
III.1. Programa de construcción.	63
III.1.1. Programa contractual	63
III.1.1.1. Construcción del plinto.....	63
III.1.1.2. Construcción del terraplén.	63
III.1.1.3. Construcción de la cara de concreto.....	64
III.1.2. Procesos constructivos.	64
III.1.2.1. Construcción del terraplén.	64
III.1.2.2. Construcción de la cara de concreto.....	65
III.1.2.3. Construcción del plinto.	66
III.2. Comportamiento durante construcción.	66
III.2.1. Deformaciones en el terraplén.	67
III.2.1.1. Asentamientos.....	67
III.2.1.2. Desplazamientos horizontales.	70
III.2.2. Módulos de deformación.	73
III.2.3. Niveles de agua.....	76
III.2.4. Deformaciones en la cara de concreto.	80
IV COMPORTAMIENTO DURANTE EL LLENADO	87
IV.1. Programa de llenado del embalse.	87
IV.1.1. Llenado teórico.....	87
IV.1.2. Llenado real.	88
IV.2. Deformaciones de la presa.	88



IV.2.1. Asentamientos.	88
IV.2.2. Desplazamientos horizontales.	95
IV.2.3. Módulos de deformación.	99
IV.3. Niveles de agua en la presa.	105
IV.3.1. Niveles piezométricos.	105
IV.3.2. Filtraciones en la cortina.	109
IV.4. Deformaciones en la cara de concreto.	110
IV.4.1. Deformaciones medidas en referencias topográficas.	111
IV.4.2. Desplazamientos horizontales.	111
IV.4.3. Desplazamientos en juntas losa-plinto.	113
IV.4.4. Desplazamientos juntas losa-parapeto.	116
IV.4.5. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.	117
IV.4.6. Medidores de juntas mecánicos.	119
IV.4.7. Desplazamientos normales a la cara de concreto.	120
IV.5. Comparación de comportamiento con Aguamilpa.	121
IV.5.1. Deformaciones de las presas.	122
IV.5.2. Módulos de deformación.	132
IV.5.3. Niveles de agua en el terraplén.	139
IV.5.3.1. Niveles piezométricos.	139
IV.5.3.2. Filtraciones en la cortina.	140
IV.5.4. Deformaciones en las losas de concreto.	141
IV.5.4.1. Desplazamientos en juntas losa-plinto.	143
IV.5.4.2. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.	146
V. CONCLUSIONES.	149
REFERENCIAS.	155



ALCANCES

Este trabajo tiene como objetivo observar el comportamiento de la presa de enrocamiento con cara de concreto El Cajón durante una de las etapas más críticas de su vida útil, el primer llenado; así como comparar los adelantos obtenidos en este diseño respecto a presas anteriores del mismo tipo. Para esto se desarrollan los siguientes capítulos.

La introducción tiene la finalidad de proporcionar un panorama general del desarrollo de las presas de enrocamiento con cara de concreto y sus generalidades geométricas y estructurales, y consideraciones de diseño.

El primer capítulo de esta Tesis será en referencia a la Presa Aguamilpa, debido a que su cortina es también del tipo de enrocamiento con cara de concreto (CFRD), a que fue construida antes que El Cajón y, a que ambas tienen características geométricas muy similares, lo cual nos permite hacer comparaciones entre ellas.

En el segundo capítulo se presentan las características generales de la central hidroeléctrica como son: su ubicación y datos generales, así como algunos aspectos del diseño de la cortina y la instrumentación instalada, esta última indispensable para entender el análisis realizado en este trabajo.

El tercer capítulo describirá brevemente los procesos constructivos y el programa contractual de obra de la cortina; en este tema no se profundiza debido a que no es el objeto de la Tesis y a que este es un tema muy amplio. Se describe el comportamiento de la cortina durante esta etapa, lo cual ayuda a comprender el comportamiento durante el llenado.

Es en el cuarto capítulo donde se desarrollará el objetivo principal de este trabajo el cual es analizar el comportamiento de la presa El Cajón durante el primer llenado, se mencionarán los factores que pueden influir en el comportamiento de una presa de este tipo como son la velocidad de llenado, filtraciones en la cortina, niveles de agua dentro del terraplén y deformaciones de sus elementos constituyentes; además se hace una comparación con el comportamiento de la presa Aguamilpa.

Finalmente, en el capítulo cinco se mencionan las conclusiones a las que se han llegado a través de la observación y análisis del comportamiento de la presa El Cajón durante esta etapa.



INTRODUCCIÓN

La primer presa de enrocamiento con cara de concreto (CFRD) fue construida en California en 1895, aunque la construcción de presas de enrocamiento a volteo sin compactar con cara de madera comenzó alrededor de la década de 1850-1860. Éstas tenían pendientes entre 0,54:1 a 0,75:1, con una capa de enrocamiento colocada a mano como soporte de la cara de concreto. Las presas de mayor tamaño (más de 100 m de altura) fueron construidas con enrocamiento colocado a volteo en capas, en ocasiones mayores de 20 o 35 m, sin compactación.

El diseño de este tipo de presas ha sido hasta ahora principalmente de modo empírico y basado en la experiencia. Muchos de estos diseños han tenido un comportamiento satisfactorio; sin embargo, algunas de ellas presentan excesivas deformación de la cara de concreto que han originado apertura de juntas y agrietamientos. Lo anterior se puede atribuir al bajo módulo de deformación del enrocamiento a volteo que se colocó sin compactar, provocando la segregación de los materiales y la acumulación de las rocas de mayor tamaño en la base de la capa, dejando vacíos y siendo particularmente compresibles y vulnerables a perder resistencia por saturación. Por tanto, entre los años de 1955 y 1965 se adoptó la compactación del enrocamiento.

En la tabla 1 se presenta un resumen de la tendencia histórica en el diseño de presas de enrocamiento con cara de concreto (CFRD)

Tabla 1. Resumen de la tendencia histórica en el diseño de CFRD.

Época	Métodos de colocación y características del enrocamiento.	Comentarios
Mitad de S. XIX a principios de S. XX	Enrocamiento a volteo (no compactado) con cara de madera.	Las primeras presas construidas con cara de madera. Normalmente con pendientes abruptas (entre 0,5:1,0 a 0,75:1,0). El primer uso de la cara de concreto fue en la década de los 1890's. La altura máxima en ésta época fue de 25 m.
1920-1930	Enrocamiento a volteo (no compactado) en capas de entre 20 a 50 cm con aplicación de agua. En la zona aguas arriba el enrocamiento era colocado a mano o con maquinaria.	Enrocamiento con buen comportamiento no susceptible a la desintegración. El promedio de altura oscilaba entre 80 y 100 m. Para presas grandes los agrietamientos en la cara de concreto resultaban en altas filtraciones.
1930-1960	Uso de altas presiones en la aplicación de agua al enrocamiento. Permanecen los métodos anteriores de colocación sin compactación del enrocamiento.	Agrietamientos en las losas de concreto, particularmente en la junta perimetral. Las altas filtraciones significaban un problema en grandes presas.
1960- a la fecha	Enrocamiento colocado en capas de uno a dos metros, con aplicación de agua y compactado. Reducción en el tamaño de las partículas. Uso de gravas y rocas de baja resistencia.	Reducción significativa de las deformaciones después de la construcción debido a la baja compresibilidad del enrocamiento compactado. Reducción de las filtraciones con promedios máximos entre 50 y 100 L/s. Mejoras continuas en el diseño del plinto y de la cara de concreto para reducir agrietamientos y filtraciones.



Terzaghi introdujo el cambio de una pantalla de impermeabilización profunda para la adopción del uso del plinto en lugares donde la excavación de la pantalla pudiera ocasionar pérdida o fractura de la roca haciéndola mas permeable; el plinto puede ser una adecuada barrera si se cimienta en la roca apropiada con inyecciones y anclajes a la roca mediante barras de acero.

Aunque en México se han construido este tipo de presas desde 1940, la más representativa es Aguamilpa con 186 m de altura construida en 1993 en el estado de Nayarit. Actualmente ha finalizado la construcción de El Cajón, en el mismo estado, con altura de 188 m, y está proyectada la construcción de las presas de La Yesca, Jal. y La Parota, Gro.

Este tipo de presas deben ser construidas en lugares donde la cimentación sea roca y se tenga la disponibilidad de conseguir los materiales del enrocamiento, la decisión sobre la selección de un tipo de presa en particular se toma en base a la alternativa de menor costo.

Las presas de enrocamiento con cara de concreto consisten en:

a) Plinto.

Es de concreto reforzado colocado en roca de baja permeabilidad, sirve para unir la cara de concreto con la cimentación de la presa (Fig. 1). El ancho del plinto se establece en función del gradiente hidráulico que puede soportar la roca de cimentación, se determina con la siguiente expresión:

$$b = \frac{H}{\Psi}$$

Donde:

H – Tirante de agua a cada elevación.

Ψ - Constante que depende de la calidad de la roca, sus valores varían entre 10 y 15.

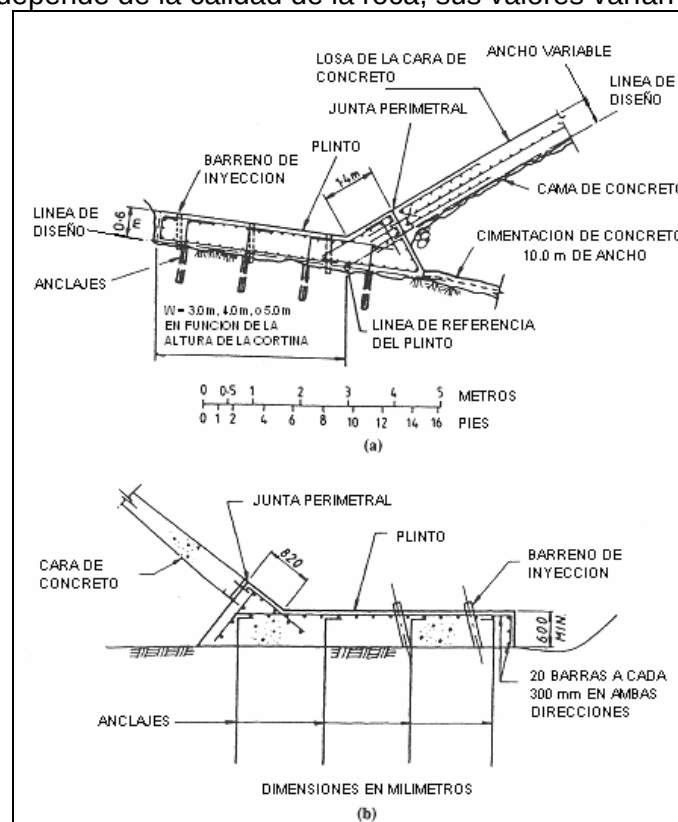


Fig. 1. Diseño común del plinto.



En los plintos apoyados sobre depósitos aluviales (plinto flotante), su ancho se ha fijado de igual manera, pero se introducen varias juntas que le permitan flexibilidad para deformarse. En estos casos la pantalla en el depósito de aluvión consiste de un muro, diseñado para soportar las deformaciones y empujes generados por el embalse, el plinto y el terraplén.

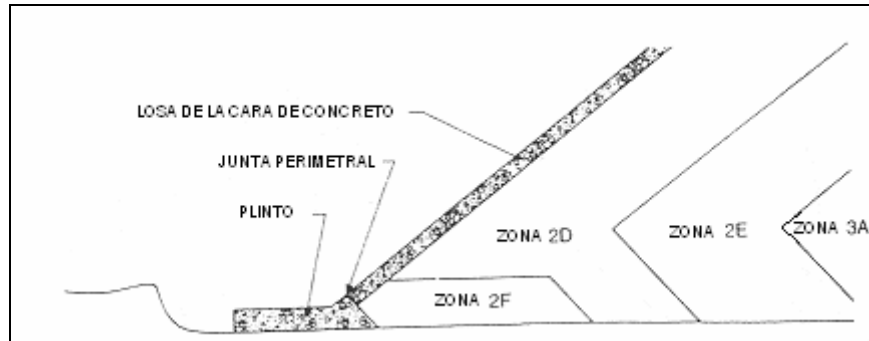


Fig. 2. Disposición del plinto, losa de concreto y material de recargue.

La roca donde se coloque el plinto debe ser inyectable y no erosionable, en ocasiones es necesario anclar el concreto a la roca.

b) Cara de concreto.

Concreto reforzado, preferentemente entre 0,25 y 0,6 m de espesor, con juntas verticales, horizontales y perimetrales para acomodar las deformaciones ocurridas durante construcción y debidas a la carga hidráulica del embalse.

El ancho de las losas está definido comúnmente por el tamaño de las cimbras deslizantes, en general varían entre 14 y 16 m. Para definir el espesor de ésta se utiliza la expresión:

$$t = m + CH$$

Donde:

t – Ancho de las losas.

H – Tirante de agua.

m – Ancho mínimo de las losas = 3 m.

C – Constante que se fija para el proyecto con valores de 0,002 a 0,003. Para presas de enrocamiento no compactado se empleó el valor de 0,0067.

El acero de refuerzo se dispone al centro de las losas con porcentajes de 0,3 en sentido horizontal y 0,4 en sentido vertical. En presas altas se ha optado por emplear 0,4 en una franja de 10 m de la junta perimetral (Fig. 3).

En las juntas que se esperan que trabajen a tensión se colocan sellos para evitar filtraciones, en estos se emplean tres materiales: el sello de cobre, PVC y "mastic o Igas", en el caso de Aguamilpa ó cenizas volantes como se usaron en El Cajón en vez de este último sello.

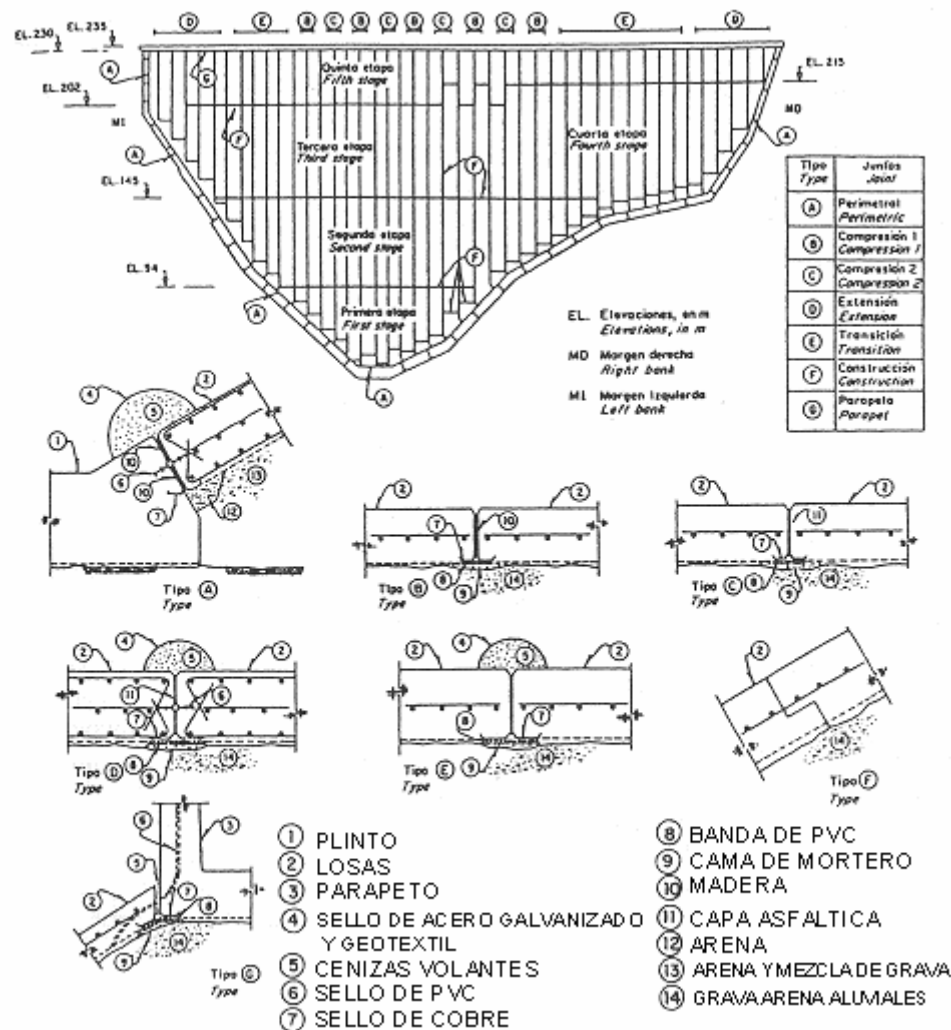


Fig. 3. Cara de concreto y diseño de juntas en la presa Aguamilpa.

c) Enrocamiento.

A continuación se enlistan los materiales típicos de este tipo de presas según la clasificación ICOLD de 1989:

Material 2D. Enrocamiento de transición, enrocamiento procesado o aluvión, con granulometría entre limos y gravas, tamaño máximo de 100 mm. Su función es proveer soporte uniforme a la cara de concreto y restringir el flujo de filtraciones en caso de agrietamiento de las losas.

Material 2E. Enrocamiento fino, roca fina seleccionada para trabajar como filtro entre los materiales 2D y 3A en caso de filtraciones.

Material 3A. Enrocamiento colocado en capas de 1,0 m de espesor aproximadamente con aplicación de agua. Esta zona funciona como soporte principal para la losa de concreto y es compactada para lograr altos módulos de deformación con el fin de limitar los asentamientos de la cara de concreto.

Material 3B. Enrocamiento colocado en capas de 1,5 a 2,0 m de espesor con la aplicación de agua. Esta zona está menos afectada por la carga del embalse que el material 3A, por lo que es aceptable un menor módulo de deformación. El espesor de las capas permite materiales de mayor tamaño.

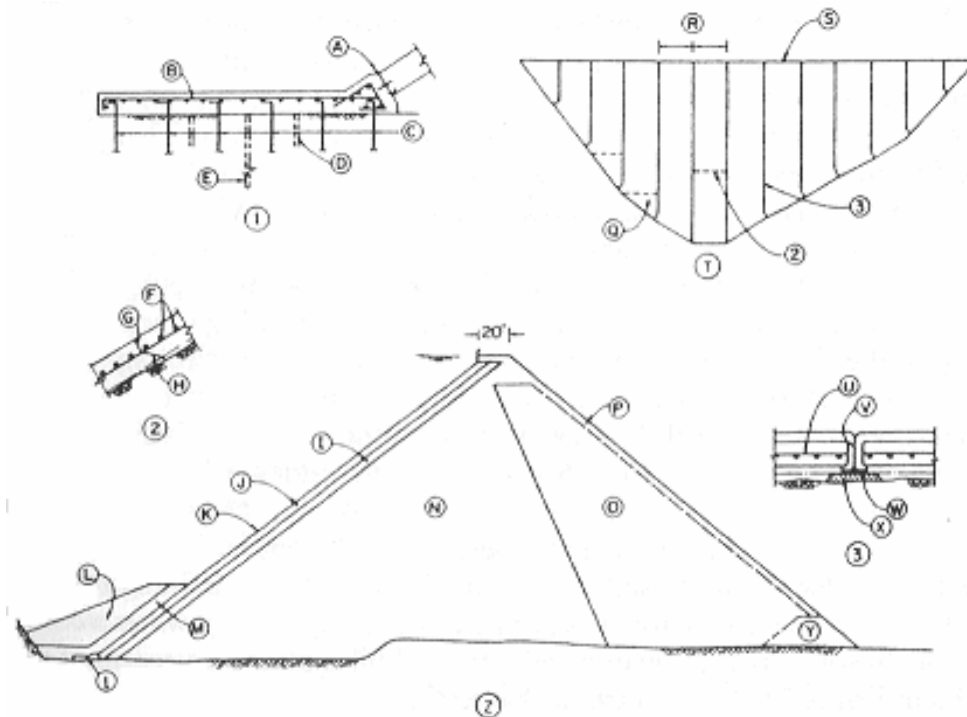


En los materiales 3A y 3B el enrocamiento debe estar bien graduado para aumentar el peso volumétrico y disminuir la relación de vacíos, se ha verificado de acuerdo con la experiencia, que las presas construidas con grava arena natural han tenido menores deformaciones debido a que su relación de vacíos es menor respecto a la de los enrocamientos.

Material 2F. Filtro que se ha incluido en algunas presas modernas colocado debajo de la junta perimetral con dos finalidades: propiciar poca deformación en la junta perimetral de losa al tener altos módulos y, trabajar como filtro en caso de apertura excesiva de la junta. El máximo tamaño de grano de este material es entre 19 y 37 mm con algunos finos, se coloca en capas de 200 mm.

La pendiente de los taludes está en función de la resistencia de los materiales y de la sismicidad del lugar. Se define a partir de análisis típicos de estabilidad y de deformación permanente.

La distribución de estos materiales está en función de sus características mecánicas y de la disponibilidad en la región, por tanto es posible que algunos de estos material no aparezcan en los diseños de presas de enrocamiento con cara de concreto (Fig. 4).



1. Plinto. 2. Junta horizontal. 3. Junta vertical. A. Junta perimétrica.
- B. Acero de refuerzo. C. Anclajes. D. Barrenos de consolidación. E. Barreno de impermeabilización.
- F. Refuerzo horizontal. G. Espesor de losa. H. junta.
- I. Material 2E. J. Material 2D. K. Cara de concreto. L. Material 1B. M. Material 1A.
- N. Material 3A. O. Material 3B. P. Enrocamiento de protección. Q. Losas de arranque.
- R. Ancho de losas. S. Eje de la cortina. T. Elevación de la cara. U. Refuerzo horizontal.
- V. Superficie cubierta con asfalto. W. Sello de cobre. X. Tapón de mortero.
- Y. Material 3D. Z. Sección de la presa.

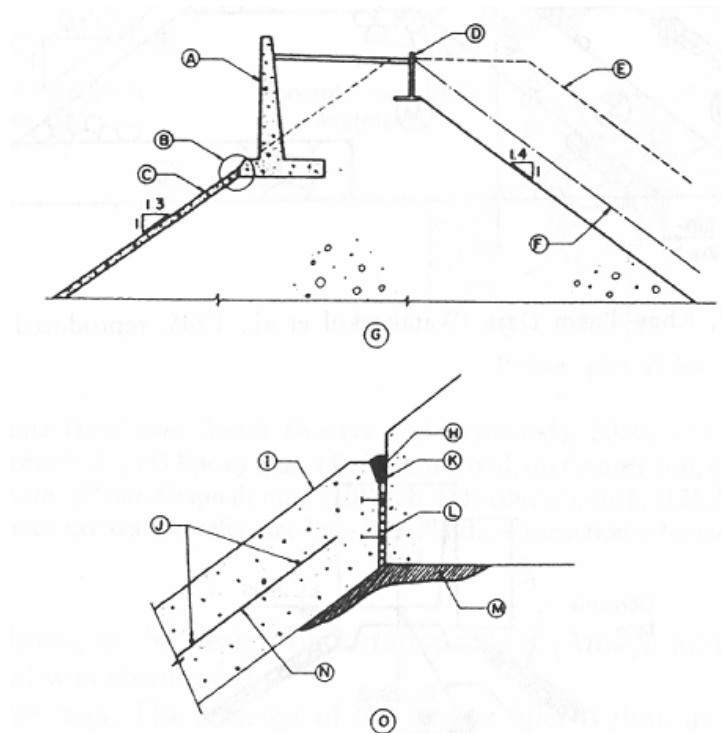
Fig. 4. Elementos principales de una CFRD y zonificación de materiales.



d) Parapeto.

El parapeto es una pared de concreto reforzado colocado en la cresta de la presa con el objeto de disminuir el volumen de material de ésta (Fig. 5). Se han usado paredes entre tres y cinco metros de altura.

El ancho de la base del parapeto usualmente es mayor a lo requerido, la pared es unida a la cara de concreto con una junta flexible. Las juntas en el parapeto deben ser verticales para permitir el asentamiento diferencial entre una sección y otra.



- B. Detalle de la junta. C. Cara de concreto. D. Parapeto aguas abajo.
E. Enrocamiento adicional en caso de no colocar parapetos.
F. Enrocamiento adicional en caso de no colocar parapeto aguas abajo.
G. Detalle de la cresta. H. Mastic o IGAS. I. Cara de concreto.
J. Refuerzo horizontal. K. Base para mastic o IGAS. L. Capa de neopreno.
M. Tapón de mortero. N. Refuerzo inclinado. O. Detalle de la junta.

Fig. 5. Detalle de la cresta (ICOLD, 1989). A. Parapeto aguas arriba.

Dos importantes aspectos para evaluar el comportamiento de las presas de este tipo son: las filtraciones a través del terraplén y el asentamiento en la corona o pérdida de bordo libre., por tanto, se comenta el conocimiento obtenido mediante el seguimiento del comportamiento de varias de las presas de enrocamiento con cara de concreto.

Las mayores deformaciones ocurren con la aplicación de fuerzas que no habían sido experimentadas por el enrocamiento anteriormente (como puede ser el primer llenado). Durante etapas de carga y descarga de fuerzas menores a las antes experimentadas (como las oscilaciones del embalse) los módulos de deformación del enrocamiento son tan altos que las deformaciones resultan limitadas.

La configuración general de las deformaciones del terraplén de una presa de este tipo son: como se muestran en la figura 6, para los periodos de construcción, primer llenado y operación.

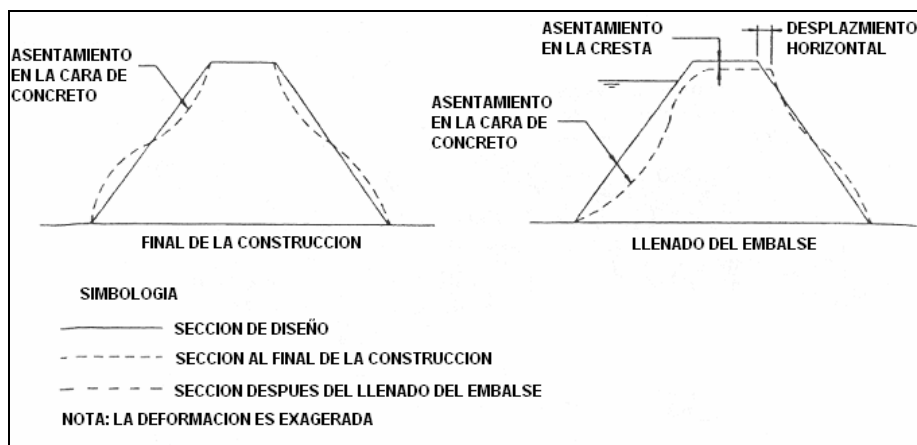


Fig. 6. Configuración de las deformaciones del terraplén durante construcción, primer llenado y operación.

En la experiencia de presas de enrocamiento con cara de concreto construidas se ha observado que en los enrocamientos sin compactar los asentamientos han sido significativos durante el primer llenado y posteriores, teniendo asentamientos totales medidos a partir del final de la construcción de cantidades entre 1,0 y 1,4 % de la altura total del terraplén.

En enrocamientos compactados los efectos de creep tienen un valor significativo en el asentamiento total de la presa, los máximos registrados hasta ahora son de aproximadamente un 0,2 % de la altura total.

Para los enrocamientos construidos con grava arena naturales las deformaciones después de la construcción son menores que los enrocamientos compactados, teniendo un asentamiento total del orden del 0,1 % de la altura total. Se han dado varias explicaciones para este fenómeno, entre ellas: el mayor peso volumétrico de las grava arenas y por tanto menores vacíos, la forma redondeada de las gravas que permite tener mayor área de contacto que las angulosas obtenidas en las voladuras de bancos de materiales, entre otras.

La cara de concreto sufre desplazamientos durante construcción, primer llenado y operación.

Durante el primer llenado, la carga hidráulica actúa sobre la cara de concreto ocasionando desplazamientos normales al plano de esta, generando tensiones en las losas perimetrales y compresiones en las losas centrales, pero también ocasiona movimientos de cortante y tensiones en las juntas perimetrales. Estos movimientos continúan con el tiempo. Es conveniente permitir que las juntas se abran para evitar agrietamientos y filtraciones.

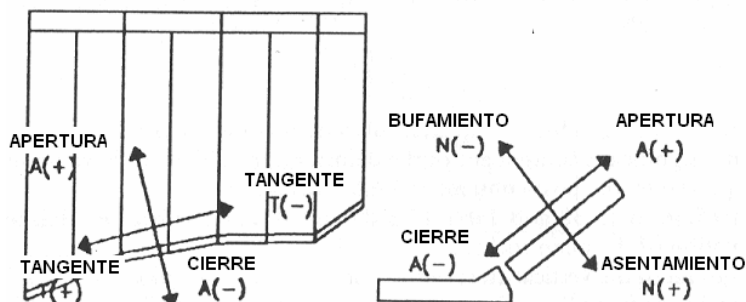


Fig. 7. Desplazamientos en la junta losa-plinto.

En las losas, el mayor desplazamiento se registra aproximadamente en la altura media de estas, pero puede variar dependiendo de la zonificación de los materiales y si la losa fue



construida monolíticamente o en varias etapas. Normalmente los desplazamientos en la cresta son menores al máximo.

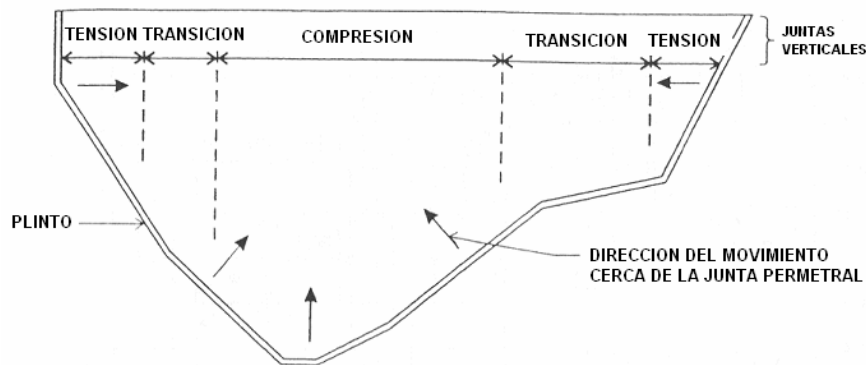


Fig. 8. Desplazamientos en la cara de concreto.

Ventajas de las Presas de enrocamiento con cara de concreto.

Este tipo de presas actualmente ha ido cambiando la tendencia de la construcción, debido a que se comienza a utilizar comúnmente en vez de construir presas de tierra con corazón impermeable, la razón es debida a las ventajas que presentan las primeras:

- Por tratarse únicamente de enrocamientos tienen mayor estabilidad lo que permite colocarlos con pendientes mayores, con gran impacto en el costo de la construcción al ser menor el volumen de material que debe ser acarreado.
- Los enrocamientos también presentan un mejor comportamiento ante las cargas debidas a los sismos.
- El empuje del agua es concentrada únicamente en la cara de concreto.
- Al no tener materiales finos, el terraplén de este tipo de presas no está sujeto a presiones de poro, esto es muy importante ya que en caso de filtraciones excesivas no generarían arrastre de materiales ni falla por tubificación, esta es la razón por la cual las filtraciones no significan un peligro para la estabilidad de estas presas.

El principal problema que ha resultado de construir este tipo de presas ha sido el agrietamiento en las losas superiores de las cortinas de mayor tamaño, esto ha generado grandes filtraciones en los enrocamientos, como se mencionó antes esto no afecta su estabilidad pero en ocasiones no es aceptable por cuestiones de operación.



I. ANTECEDENTES. COMPORTAMIENTO DE LA PRESA AGUAMILPA.

I.1. Generalidades de la presa Aguamilpa.

La presa de Aguamilpa está desplantada en el río Santiago en los municipios de Tepic y el Nayar del estado de Nayarit, al noreste de la ciudad de Tepic. Su construcción es del tipo enrocamiento con cara de concreto y durante varios años fue la más alta en su tipo.

La C. H. Aguamilpa forma parte del desarrollo hidroeléctrico del río Santiago, el cual también incluye al P. H. El Cajón en el estado de Nayarit, el P. H. La Yesca y la C. H. Santa Rosa en el estado de Jalisco, entre otros. El potencial de generación del sistema es de 11 092 GWh anuales.

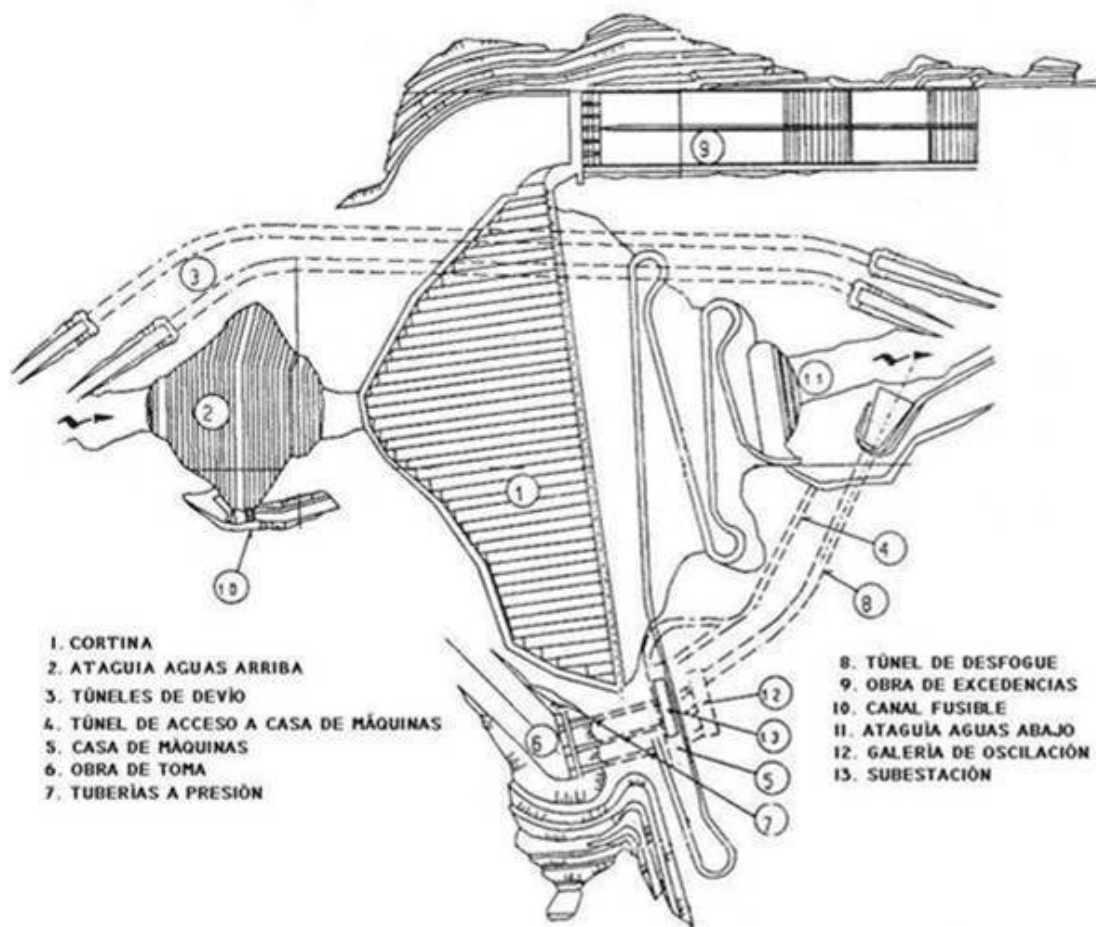


Fig. I.1. Esquema general de la C. H. Aguamilpa

I.1.1. Datos de Diseño.

Para el diseño del vertedor de la presa Aguamilpa se tomaron en cuenta los gastos máximos anuales de 1942 a 1995 a partir de la información obtenida en estaciones hidrométricas y climatológicas de la cuenca. Los datos de diseño generales se muestran en la tabla I.1.



Tabla I.1 Datos de diseño de la C. H. Aguamilpa.

Área de la cuenca de Aguamilpa	73 834 km ²
Número de años de registro	43
Escorrentamiento medio anual (1943-1979)	6 948 hm ³
Gasto medio anual	220.34 m ³ /s
Uso futuro medio anual aguas arriba	212 hm ³
Escorrentamiento neto medio anual aprovechable	6 736 hm ³
Volumen medio mensual de escorrentamiento	561 hm ³
Gasto medio anual futuro	213.61 m ³ /s
Volumen medio anual aprovechable	6 257 hm ³
Gasto medio aprovechado	198.4 m ³ /s
Azolve medio anual en suspensión	8.14 hm ³
Azolve medio anual en acarreo	2.78 hm ³
Vaso de almacenamiento:	
a) Elevaciones:	Capacidad
NAMINO 190 msnm	2 965 hm ³
NAMO 220 msnm	5 540 hm ³
NAME 232 msnm	6 950 hm ³
b) Capacidad para azolves (piso de toma)	1 650 hm ³
c) Capacidad útil (NAMO – NAMINO)	2 575 hm ³
d) Capacidad para control de avenidas (NAME –NAMO)	1 410 hm ³
e) Área ocupada por el embalse al NAME	128 km ²
f) Área ocupada por el embalse al NAMO	109 km ²

I.1.2. Descripción de la obra de Contención.

Estas obras están constituidas básicamente por las ataguías de aguas abajo y aguas arriba que fueron estructuras temporales y cuya función principal fue obstruir el paso del agua hacia el recinto y evitar su regreso durante la construcción de la cortina, y la cortina.

La ataguía de aguas arriba es de materiales graduados desplantada en el aluvión natural del río, con 55 m de altura (Elev. 118 msnm) y 288 m de longitud de cresta. Su construcción se inició simultáneamente a la excavación de los túneles desvío y cuyo material sirvió para la misma. Por otra parte, la ataguía de aguas abajo se construyó con materiales graduados en dos etapas, la primera a la elev. 70 msnm para construir la pantalla flexoimpermeable y así evitar el regreso del agua al recinto después de salir de los túneles; posteriormente se construyó la galería de captación de filtraciones para finalmente completar la colocación de materiales hasta la elev. 80 msnm.

La cortina se encuentra en una boquilla regular con forma de U abierta, con sección asimétrica y laderas a 30°. La roca sobre la que se desplanta el plinto es volcánica terciaria de composición riolítica-dacítica. El 90 % sobre la unidad Aguamilpa, tobas bien litificadas; sobre ésta se encuentra la unidad Colorines, también formada por tobas litificadas pero no tan antigua como la anterior y con una pseudoestratificación. La unidad Colorines está ubicada en la parte superior de la margen derecha; ambas unidades están intersectadas por diques.

La altura total de la presa Aguamilpa, desde el desplante del plinto al nivel del lecho del río, hasta la parte superior del parapeto, es de 185.5 m; el volumen total de la cara de concreto es de 78 250 m³ en un área de 136 700 m² y el volumen total de materiales fue de 13 732 449 m³, de los cuales el 54 % corresponde a materiales aluviales y el resto a enrocamiento. El cuerpo de la cortina está constituido por tres materiales: 3-B (aluvión), T (material de transición y 3-C (enrocamiento). El talud aguas arriba es 1,5:1, la frontera entre el material 3-



B y el T coincide con el eje de la cortina, la frontera entre los materiales 3-C y T es a partir de la corona coincidiendo con el eje de la cortina con un talud 0.5:1 y, el talud aguas abajo es 1,4:1 (Fig. I.2, tabla I.2)).

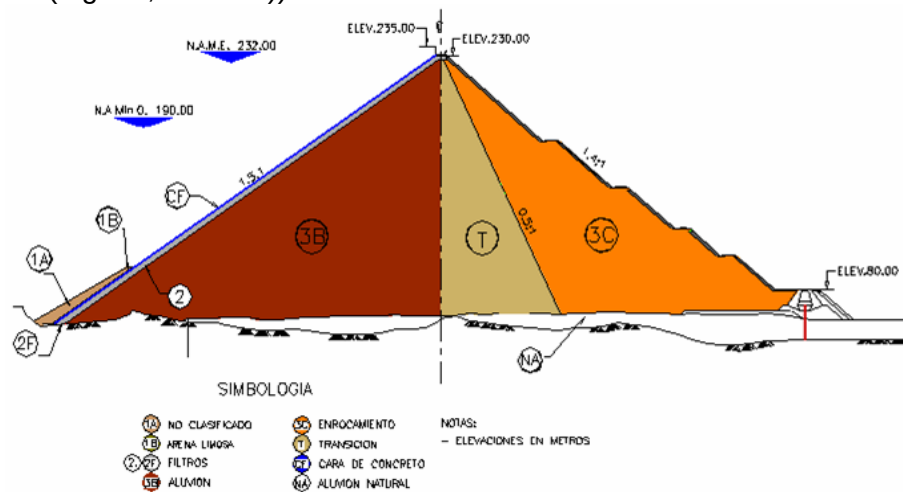
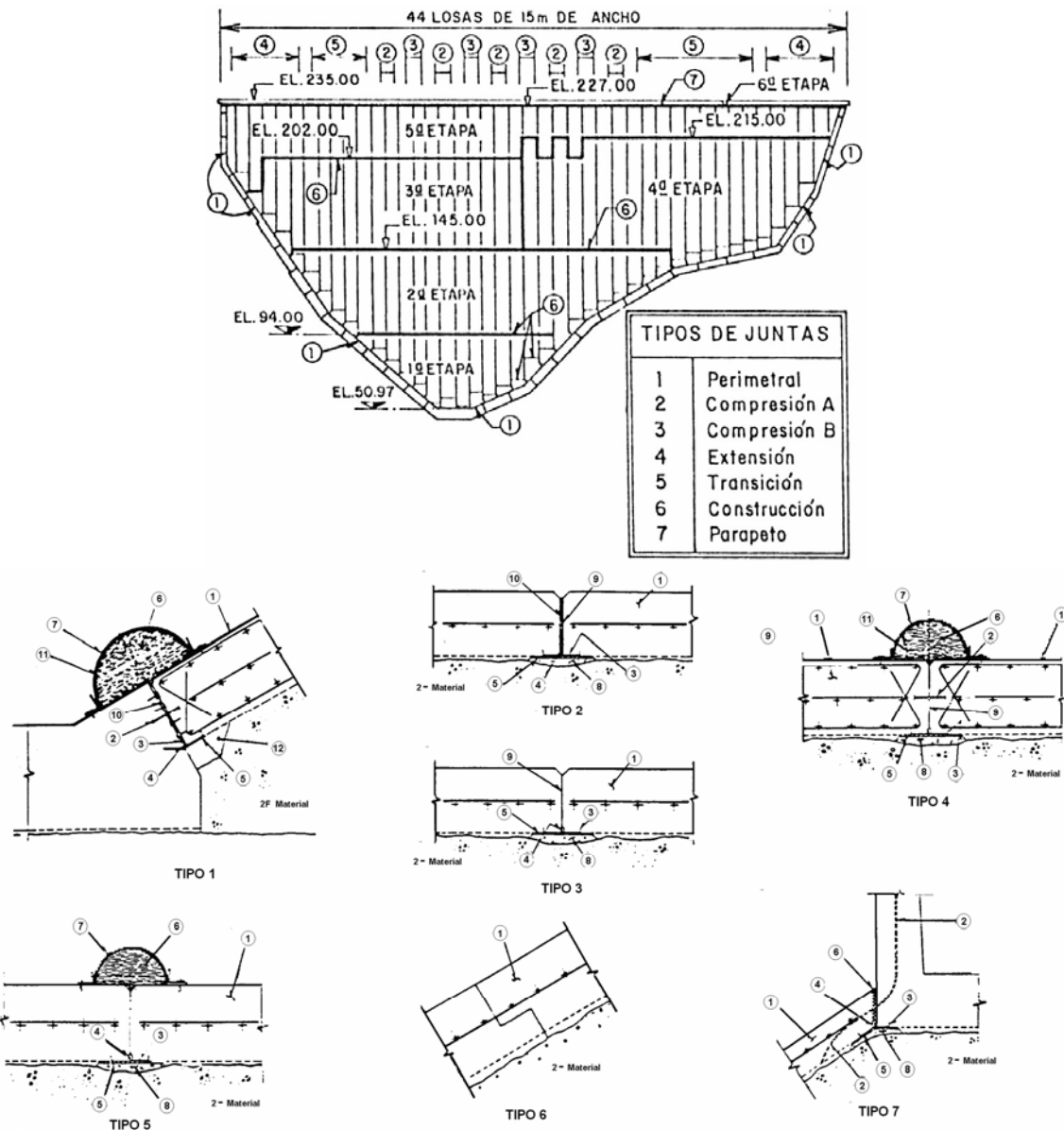


Fig. I.2. Sección máxima de la cortina.

El elemento impermeable esta constituido por 44 losas de concreto de 15 m de ancho y espesor variable. Entre losas, entre losas y plinto, y entre losas y parapeto se dispusieron juntas para permitir su construcción y para lograr que la cara fuera una superficie flexible capaz de deformarse ante las cargas durante construcción y el primer llenado (tabla I.2 y Fig. I.3).

Tabla I. 2. Datos de diseño de la cortina.

Tipo: enrocamiento con cara de concreto CFRD	
Elev. máxima de la cortina	235.5 msnm
Elev. de la corona	230.0 msnm
Longitud de la corona	680.0 m
Altura total desde el desplante	185.5 m
Franja de desplante	550.0 m
Volumen de terraplenes	13 732 449.0 m ³
Talud aguas arriba	1.5:1
Talud aguas abajo	1.4:1
Bordo libre	3.0 m ²
Plinto	
Desplante	49.5 msnm
Longitud	990.0 m
Excavación	408 737.0 m
Volumen de concreto	8 890.0 m ³
Acero de refuerzo	349.0 ton
Junta perimetral	990.0 m ³
Cara de concreto	
Área	136 700.0 m ²
Volumen	78 520.0 m ³
Acero de refuerzo	4 498.0 ton
Juntas horizontales	595.0 m
Juntas verticales:	
Tipo 2	1 322.0 m
Tipo 3	3 357.0 m
Tipo 4	877.0 m
Tipo 5	2 588.0 m



1.- Cara de concreto. 2.- Sello de PVC. 3.- Sello de cobre. 4.- Banda de neopreno.
5.- Banda de PVC. 6.- Ceniza volante. 7.- Contenedores de cenizas. 8.- Tapón de mortero. 9.- Capa de asfalto. 10.- Madera. 11.- Geotextil. 12.- Arena asfáltica.

Fig. I.3. Localización y tipo de juntas.

I.2. Instrumentación instalada.

La instrumentación geotécnica de la cortina de la C. H. Aguamilpa fue proyectada para contar con la información necesaria con el mínimo de aparatos, con el fin de minimizar las posibles interferencias a la construcción.

Los parámetros a medir elegidos fueron:

- Niveles hidráulicos de agua en el cuerpo de la cortina.
- Desplazamientos del cuerpo de la cortina, tanto internos como superficiales.
- Movimientos de las juntas verticales y perimetral de la cara de concreto.
- Registro de la precipitación pluvial en la zona de la cortina.
- Aforo de filtraciones.
- Registro de eventos sísmicos.



g) Esfuerzos y deformaciones en el interior del cuerpo de la presa.

En el cuerpo de la cortina se instrumentaron: tres secciones paralelas al eje del río correspondientes a los ejes de las losas 18, 22 y 27 de la cara de concreto; en el eje de la presa y a nivel superficial sobre las losas.

En cada sección transversal se instrumentó en cuatro elevaciones: cimentación, elevación 90, elevación 140 y elevación 180. Se eligieron cinco tipos de aparatos de medición y un sistema de control superficial conocido como líneas de colimación, además de contar con aparatos para determinar los niveles y el flujo del agua en galerías y las aceleraciones sísmicas de la estructura:

- Inclínómetros.
- Celdas de presión (Tipo CFE).
- Piezómetros neumáticos (Tipo CFE) y abiertos (Tipo Casagrande)..
- Extensómetros (Tipo CFE).
- Niveles hidráulicos de asentamientos (Tipo CFE).
- Medidores de filtraciones en galerías.
- Acelerógrafos.

El proyecto de instrumentación se dividió básicamente en dos partes, la primera fue la instrumentación en el cuerpo de la cortina y la segunda, la instrumentación en la cara de concreto.

I.2.1. Cuerpo de la cortina.

La instrumentación de la cortina comprendió inicialmente dos ejes de instalación y estudio, separados uno del otro 60 metros, los cuales coinciden con las losas 18 y 22 respectivamente, a su vez cada eje tiene cuatro plataformas con diferentes instrumentos a las elevaciones: cimentación, elevación 90, 140 y 180. Posteriormente se introdujeron cambios incluyendo la adición de otro eje coincidente con la losa 27 (Figs. I.4 Y I.5, Tabla I.3).

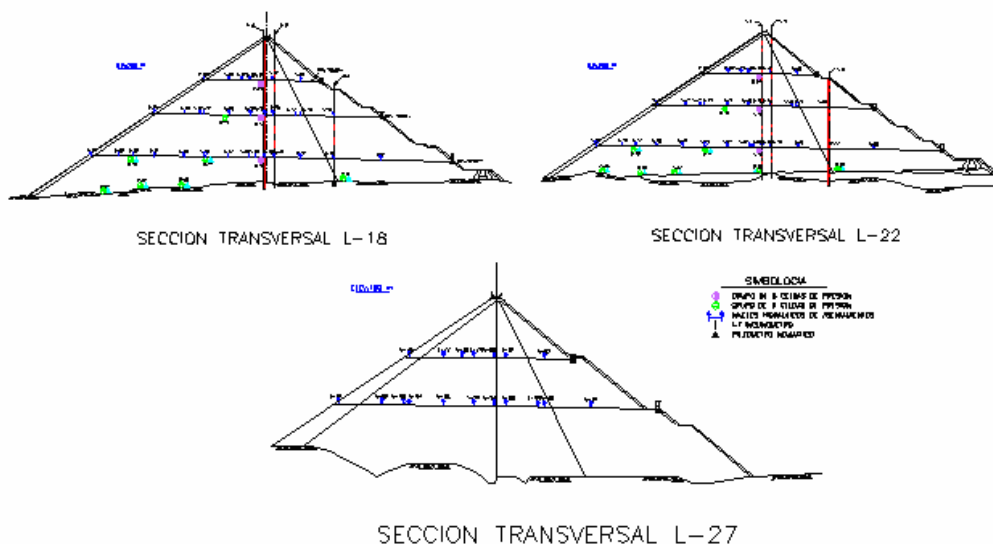


Fig. I.4. Instrumentación en las secciones 18, 22 y 21.



Tabla I.3. Instrumentación del cuerpo de la cortina de la C. H. Aguamilpa.

Aparato	Cimentación	Elevación			Corona	Total
		90	140	180		
Inclinómetros	6	1	1	-	-	8
Celdas de presión	30	26	20	14	-	90
Piezómetros neumáticos	9	6	2	-	-	17
Extensómetros lineales	6	12	12	12	-	42
Niveles hidráulicos	-	28	20	12	-	60
Referencias superficiales	-	18	31	40	102	191
Acelerógrafos	1	-	-	1	3	4
Casetas de medición	1	2	2	2	5	12
Medidores de filtración	2	2	2	2	-	8
Piezómetros abiertos	-	4	4	4	2	14

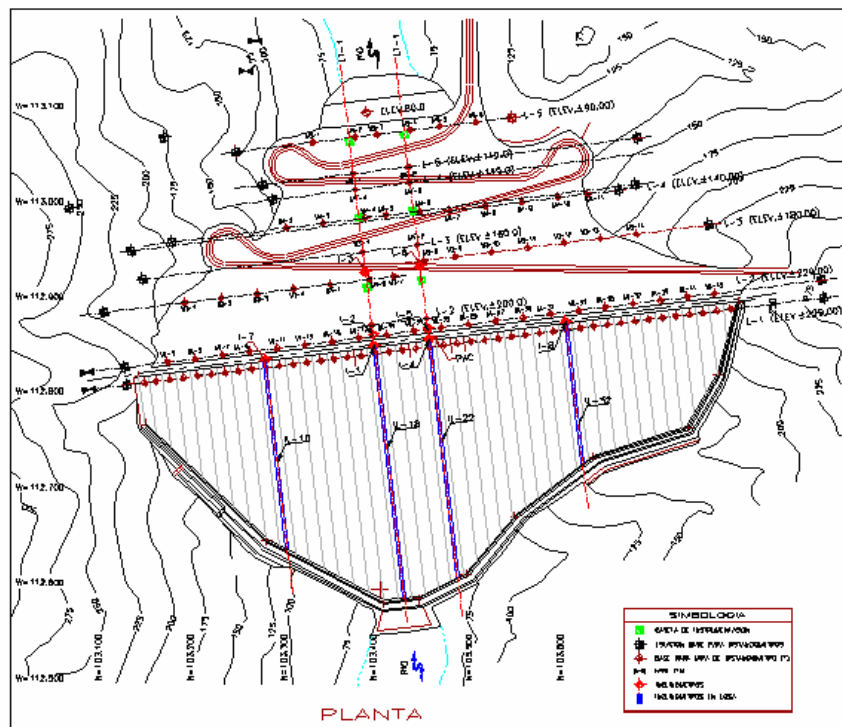


Fig. I.5. Distribución de la instrumentación en planta.

I.2.2. Cara de concreto.

El conocimiento del comportamiento de la cara de concreto es de vital importancia al ser el elemento impermeable de las presas de tipo CFRD. A continuación se muestran los datos y la ubicación de los instrumentos instalados en la cara de concreto (Tabla I.4, Fig. I.6).

Tabla I.4. Instrumentación en la cara de concreto.

Instrumento	Cantidad
Extensómetros tridimensionales	19
Extensómetros bidimensionales	1
Extensómetros unidimensionales	35
Medidores de junta tipo placa calibrador	45
Bases para mira topográfica	48
Inclinómetros inclinados	4
Ref. topográficas provisionales	161
Ref. topográficas en parapeto	94
Casetas de medición en corona.	4



Con los niveles hidráulicos de asentamientos se midieron los asentamientos desde la instalación de cada instrumento. Para ésta tesis se presentan los asentamientos después de la construcción y durante el primer llenado, con el fin de hacerlos comparables con la mediciones tomadas en las mismas etapas en El Cajón (Tabla I.5, Fig. I.7).





Tabla I. 5. Asentamientos de los materiales que componen el terraplén.

Sección	Elevación (m.s.n.m.)	Material	Aparato	Fecha de instalación	Asentamiento después de construcción (cm)	Asentamiento durante el primer llenado (cm)	Asentamiento Total (cm)
L-18	90	3B	V-6	18-Mar-91	18,5	3,8	22,3
		T	V-12	14-Mar-91	53,4	7,9	61,3
		3C	V-14	23-Ene-91	85,1	4,9	90
	140	3B	V-33	4-Abr-92	28,5	8	36,5
		T	V-37	15-Nov-91	130,4	18,6	149
		3C	V-39	29-Oct-91	177,9	18,5	196,4
	180	3B	V-64	28-Oct-92	29,2	11,2	40,4
		T	V-67	24-Oct-92	61,2	20,2	81,4
		3C	V-68	31-Oct-92	77,6	24,6	102,2
L-22	90	3B	V-20	20-Mar-91	21	2,4	26,4
		T	V-26	28-Feb-91	56,7	10,6	67,3
		3C	V-28	6-Ene-91	87,1	5,8	92,9
	140	3B	V-44	7-Mar-92	31,6	8,5	40,1
		T	V-47	22-Nov-91	91,4	17,3	108,7
		3C	V-50	11-Ene-91	173,4	20,1	193,5
	180	3B	V-71	6-Nov-92	28,5	12,3	40,8
		T	V-74	26-Oct-92	59,3	21,3	80,6
		3C	V-75	29-Oct-92	77,6	25,8	103,4
L-27	140	3B	V-54	10-Abr-92	12	5,3	17,3
		T	V-59	23-Nov-91	104,7	16,6	121,3
		3C	V-61	14-Nov-91	148,7	16,3	165
	180	3B	V-78	20-Nov-92	22	10,5	32,5
		T	V-81	19-Oct-92	56,2	20,7	76,9
		3C	V-82	17-Oct-92	78,2	24,9	103,1

Durante la construcción los mayores asentamientos en el cuerpo del terraplén se registraron en la zona del material 3C, con un máximo de 177,9 cm en el aparato V-39 de la elevación 140 en la sección L-18. El menor fue de 12 cm en el aparato V-54 que se encuentra en la elevación 140 de la sección L-27. Al final del primer llenado el máximo asentamiento fue de 196,4 cm en el mismo aparato de la etapa de construcción (V-39) de la zona 3C. (Figs. I.8 y I.9, Tabla I.6)

Atrás de la cara de concreto los máximos asentamientos ocurrieron en la sección L-18 en la elevación 180, tanto para construcción como para primer llenado. En las tablas I.9 y I.10 se encuentran los valores medidos en cada aparato.

Tabla I. 6. Asentamientos medidos en NHA atrás de la cara de concreto.

Elevación (msnm)	Sección					
	L-18		L-22		L-27	
	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)
Después de construcción						
90	V-1	2,4	V-15	2,6	----	----
140	V-29	5,4	V-40	5,4	V-51	2,9
180	V-62	10,1	V-69	9,8	V-76	7,0
Después del primer llenado						
90	V-1	10,1	V-15	9,7	----	----
140	V-29	14,3	V-40	14,6	V-51	9,9
180	V-62	18,9	V-69	19,1	V-76	14,6

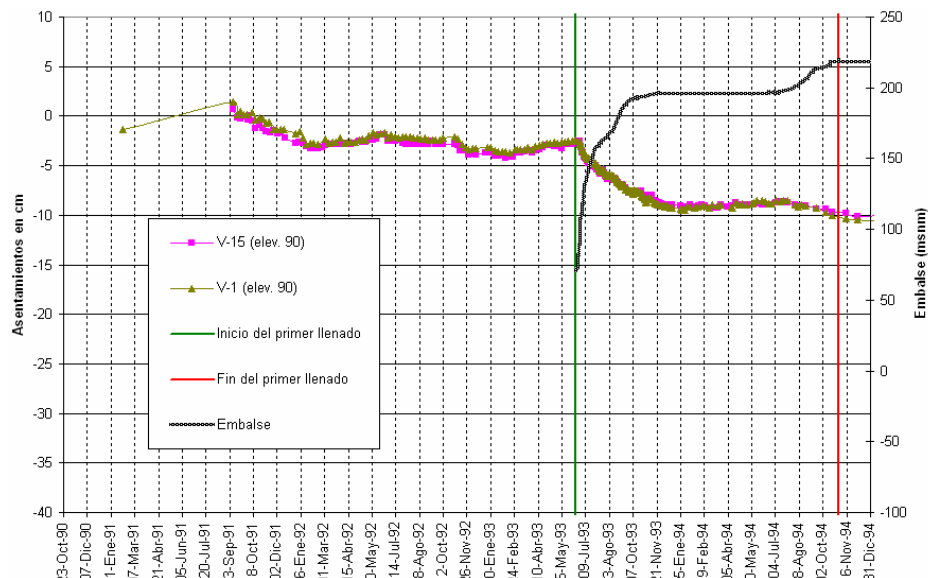


Fig. I. 8. Asentamientos en losas concreto. Elev. 90.

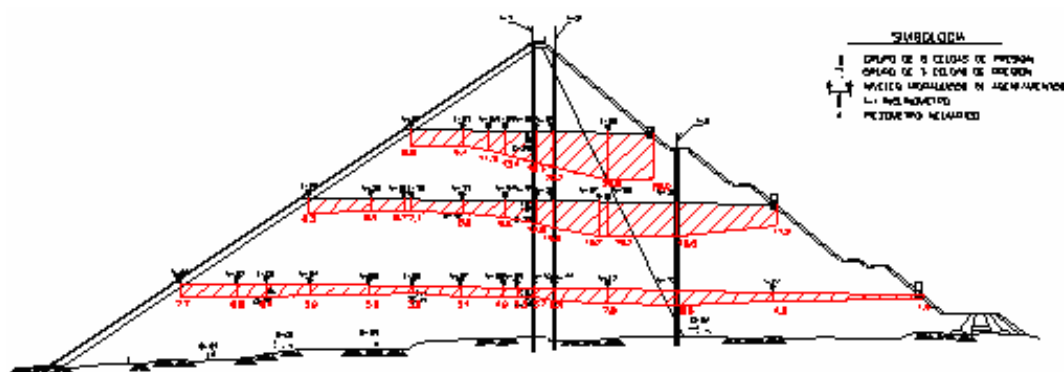


Fig. I. 9. Asentamientos medidos con NHA. Sección L-18.

Con los inclinómetros instalados se registraron los asentamientos en el cuerpo de la cortina, en las cuatro líneas transversales asociadas a las losas L-10, L18 y L-22 y L-32. De manera representativa se muestran los asentamientos en el inclinómetro I-5 en la figura I.31 y en la tabla I.12 se concentran los valores registrados en todos los inclinómetros. Con el fin de contar con asentamientos comparables con los registrados en los niveles hidráulicos, se interpolaron los registros en inclinómetros para el 31 de octubre de 1994.

Tabla I.7. Asentamientos en inclinómetros en el primer llenado.

Aparato	Medición anterior		Medición posterior		Asentamiento interpolado (cm)
	Fecha	Asentamiento (cm)	Fecha	Asentamiento (cm)	
I-1	13/May/94	17,9	5/Dic/94	22,8	22
I-2	11/May/94	20,2	5/Dic/94	25,4	24,5
I-3	1/Jun/94	19,6	28/Nov/94	24,1	23,4
I-4	13/May/94	19	5/Dic/94	23,7	22,9
I-5	11/May/94	20,8	5/Dic/94	26,1	25,2
I-6	11/May/94	20,1	28/Nov/94	25,4	24,7
I-7	13/May/94	11,2	5/Dic/94	14,6	14
I-8	20/May/94	14,6	5/Dic/94	18,1	17,5

Los mayores asentamientos se registraron en el inclinómetro I-5 ubicado sobre la sección de la losa L-22; su asentamiento máximo fue de 20,8 cm el 11 de mayo de 1994 y 26,1 cm el 5



de diciembre de 1994. Interpolando entre estos valores el desplazamiento máximo aproximado sería 25,2 cm. La ubicación de este inclinómetro coincide con el material 3-C; el mismo material en el que se tuvieron los mayores asentamientos en NHA.

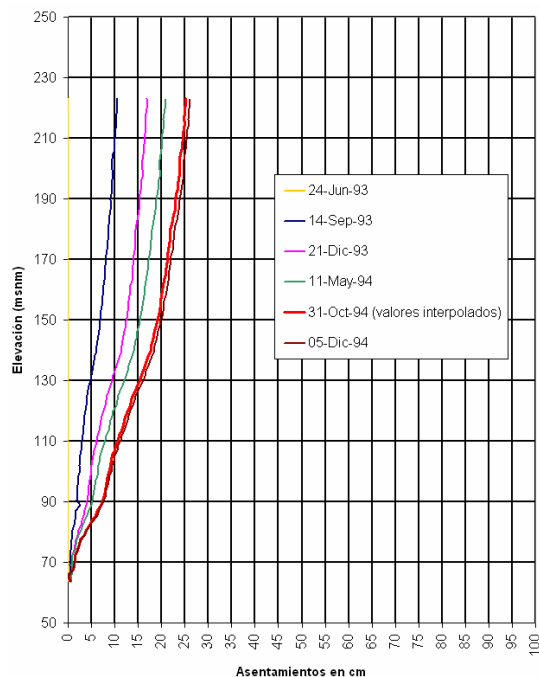


Fig. I. 10. Asentamientos en inclinómetro I-5.

Para conocer los asentamientos superficiales de la cortina, se instalaron líneas de referencias topográficas distribuidas en líneas transversales. La instalación de estas referencias se desarrolló hasta después del primer llenado, por lo que no todas ellas se consideraron para evaluar el llenado. De la manera similar se interpolaron los valores para conocer el asentamiento el 31 de octubre de 1994.

Durante la etapa del primer llenado, en el enrocamiento aguas abajo de la cortina se registraron los mayores asentamientos a la elev. 180 (línea de mojoneras L-3), el valor de 27,7 cm medido en la mojonera M3-8 se presenta entre la losas L-22 y L-23. El valor interpolado para la fecha del 31 de octubre de 1994 resultó ser 27,3 cm.

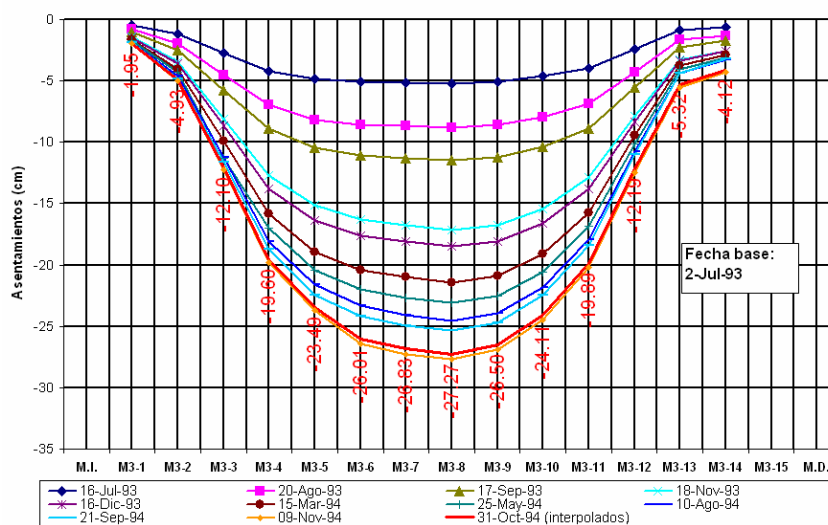


Fig. I. 11. Asentamientos en enrocamiento. Línea L-3. Elev. 180.



Tabla I.9. Asentamientos en referencias superficiales.

Aparato	Medición anterior		Medición posterior		Asentamiento interpolado (cm)
	Fecha	Asentamiento (cm)	Fecha	Asentamiento (cm)	
L-1	6/Sep/94	6,0	7/Nov/94	7,9	7,7
L-2	23/Sep/94	1,4	4/Nov/94	2,5	2,4
L-3	21/Sep/94	25,3	9/Nov/94	27,7	27,3
L-4	19/Sep/94	11,0	9/Nov/94	11,8	11,6
L-5	20/Sep/94	2,1	7/Nov/94	2,3	2,3

Se instalaron además dos líneas transversales sobre los ejes de las losas L18 y L-22, con las que se midieron los asentamientos en cuatro elevaciones diferentes.

En la línea ubicada en la sección L-18 el mayor asentamiento registrado fue de 30,2 cm a la elev. 200 el 9 de noviembre de 1994; interpolando para el 31 de octubre se obtiene el asentamiento de 29,9 cm.

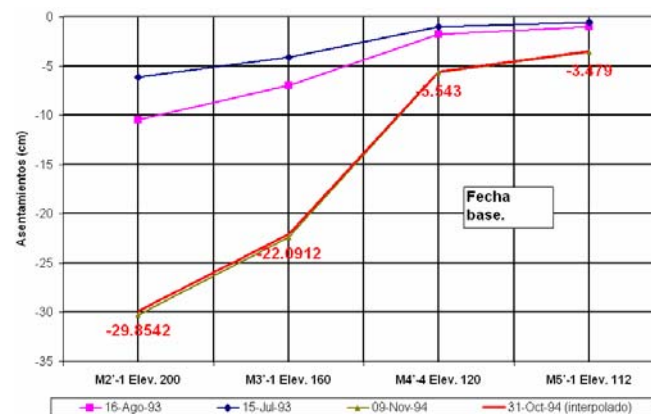


Fig. I. 12. Asentamientos en enrocamiento. Sección L-18.

En la sección L-22 también fue mayor el asentamiento a la elev. 200, el valor registrado fue de 30,4 cm en la misma fecha e interpolando se tuvo 30 cm el 31 de octubre.

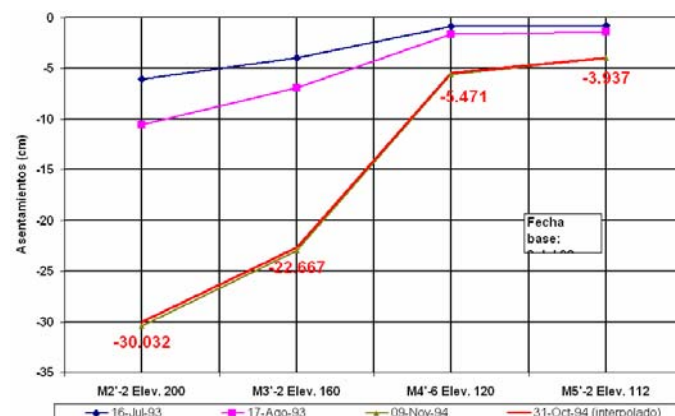


Fig. I. 13. Asentamientos en enrocamiento. Sección L-22.

Integrando los asentamientos en niveles de asentamientos, inclinómetros y referencia superficiales se obtuvieron los contornos de asentamientos mostrados en la figura (Fig. I.14).

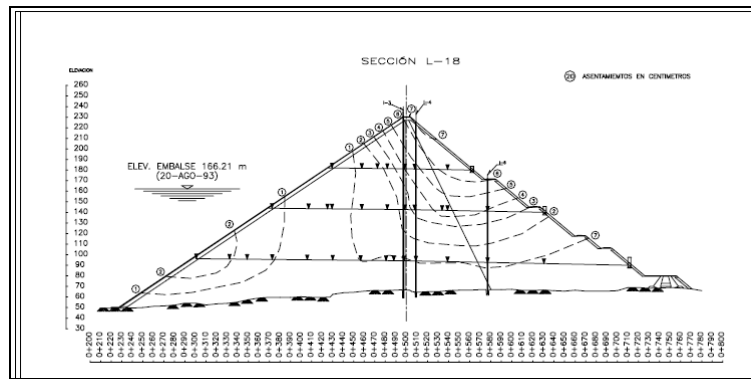


Fig. I. 14. Curvas de igual asentamiento para el 31 de octubre de 1994.

I.3.1.2. Desplazamientos horizontales.

Los desplazamientos horizontales fueron medidos en el eje del río y en el eje de la cortina mediante inclinómetros, y en el eje del río en las referencias topográficas.

En el aparato I-1 ubicado en la sección L-18 el movimiento sobre este eje fue hacia aguas abajo con un máximo de 25,6 cm al 1 de diciembre de 1994, interpolando con las mediciones más próximas se tendría un desplazamiento máximo de 24,6 cm. Dicho desplazamiento se localizó en la boquilla del aparato.

Tabla I.12. Desplazamientos horizontales en inclinómetros en el primer llenado.

Aparato	Medición anterior			Medición posterior			Desplazamientos interpolado (cm)	
	Fecha	Desplazamientos (cm)		Fecha	Desplazamientos (cm)			
		Eje río	Eje cortina		Eje río	Eje cortina	Eje río	Eje cortina
I-1	6/Ago/94	22,2	0,2	1/Dic/94	25,2	3,6	24,6	2,7
I-2	17/Ago/94	22,4	11,4	1/Dic/94	25,5	13,3	24,6	12,7
I-3	4/Jun/94	10,6	-0,2	29/Nov/94	12,5	-0,8	12,2	-0,7
I-4	5/Ago/94	21,7	-12,2	30/Nov/94	24,4	-5,3	23,7	-7,1
I-5	25/Ago/94	-0.2	-14,8	30/Nov/94	3,7	-17,9	2,4	-16,9
I-6	16/Ago/94	13,7	-0,3	29/Nov/94	14,6	-3,8	14,3	-2,8
I-7	26/Ago/94	15,3	4,8	2/Dic/94	17,4	8,0	16,7	6,9
I-8	26/Ago/94	14,0	-12,8	2/Dic/94	14,0	-12,5	14,0	-12,6

* En la dirección eje río los signos indican (+) hacia aguas abajo, (-) hacia aguas arriba. En la dirección eje cortina los signos indican (+) hacia margen derecha, (-) hacia margen izquierda.

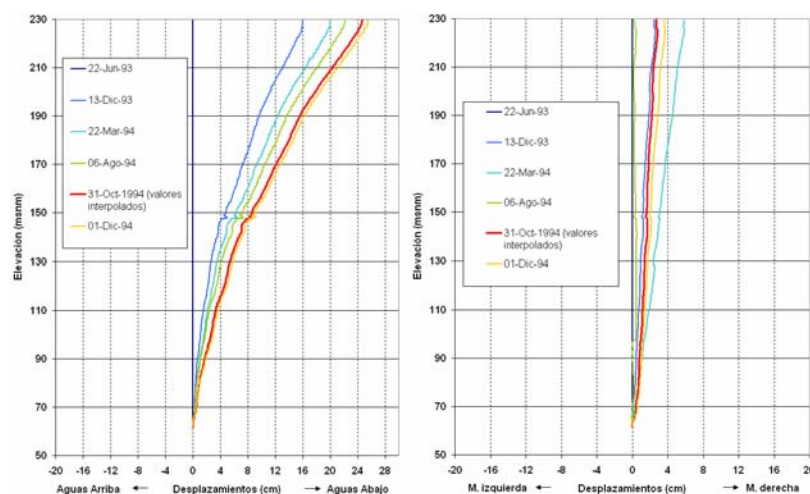


Fig. I. 15. Desplazamientos horizontales en inclinómetros.
Eje río y eje cortina. I-1.



El inclinómetro I-1 la tendencia de los desplazamientos en el eje de la cortina presenta oscilación hacia ambos márgenes, en la última medición registrada después del primer llenado fue de 3,6 cm con dirección hacia margen derecha. En valor interpolado es de 2,7 cm en la misma dirección. En este caso la interpolación no es muy confiable porque no se tiene certeza sobre la dirección del movimiento del aparato. Sin embargo, es posible asegurar que la tendencia del movimiento ha de mantenerse hacia margen derecha.

Los desplazamientos horizontales medidos durante la etapa del primer llenado se pueden resumir asegurando que el terraplén tuvo movimientos hacia aguas abajo y hacia el centro del cauce, con valores máximos en la zona central y en donde el terraplén es más alto lo cual se puede observar en la tabla I.12.

En la línea L-3 se presentan los mayores los desplazamientos horizontales, con dirección hacia aguas abajo y valor máximo de 16,44 cm en la zona central asociada a la losa L-20, los demás desplazamientos medidos en el terraplén se resumen en la tabla I.13.

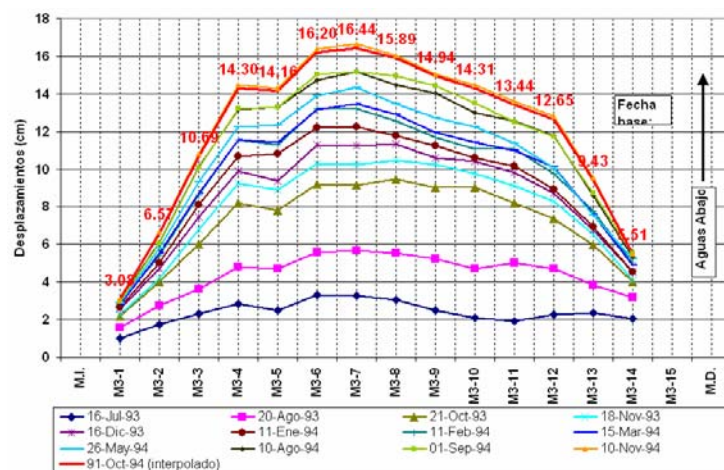


Fig. I. 16. Desplazamientos horizontales. L-3. Elev. 180.

Tabla I.13. Desplazamientos horizontales en inclinómetros en el primer llenado.

Aparato	Medición anterior		Medición posterior		Desplazamientos interpolado (cm)
	Fecha	Desplazamientos (cm)	Fecha	Desplazamientos (cm)	
		Eje río Eje cortina		Eje río Eje cortina	
L-1	27/Sep/94	4,1	15/Nov/94	5,4	4,9
L-2	6/Sep/94	3,8	7/Nov/94	5,2	5,0
L-3	1/Sep/94	15,2	10/Nov/94	16,6	16,4
L-4	20/Sep/94	10,5	10/Nov/94	11,2	11,1
L-5	19/Sep/94	3,9	7/Nov/94	4,3	4,2

* Los signos indican (+) hacia aguas abajo, (-) hacia aguas arriba.

I.3.1.3. Módulos de Deformación.

La diferencia entre los módulos de deformación es un reflejo de la diferencia en las deformaciones de cada material lo que provocó grandes desplazamientos horizontales, doble curvatura en la losa de concreto y a su vez agrietamientos en ésta y filtraciones importantes, por tanto importante el cálculo de modulo de deformabilidad de cada material tanto en la etapa de construcción como del llenado.

Los módulos de deformación de los materiales que constituyen el terraplén se calcularon a partir de las deformaciones medidas con NHA, inclinómetros y grupos de celdas y extensómetros.



I.3.1.3.1 A partir de Niveles hidráulicos de asentamiento.

Es preciso mencionar que la fórmula propuesta por Penman considera las deformaciones en sentido vertical (asentamientos) y, la carga en la misma dirección sobre el punto del terraplén donde se encuentra el NHA, estas cargas corresponden al peso del material y de la losa de concreto, más la carga hidráulica debida al embalse, esto se puede escribir del siguiente modo.

$$\sigma = \gamma_{material} \cdot h + \gamma_{concreto} \cdot e + \gamma_w \cdot h_w$$

Donde:

σ – Esfuerzo vertical sobre el aparato.

γ_{mat} – Peso volumétrico del material.

h – Espesor de material sobre el aparato.

$\gamma_{concreto}$ – Peso volumétrico del concreto.

e – Espesor de la cara de concreto en la proyección vertical del NHA.

γ_w – Peso volumétrico del agua.

h_w – Carga hidráulica sobre la proyección vertical del NHA.

La siguiente figura es útil para visualizar las variables implicadas en este cálculo y en la fórmula propuesta por Penman.

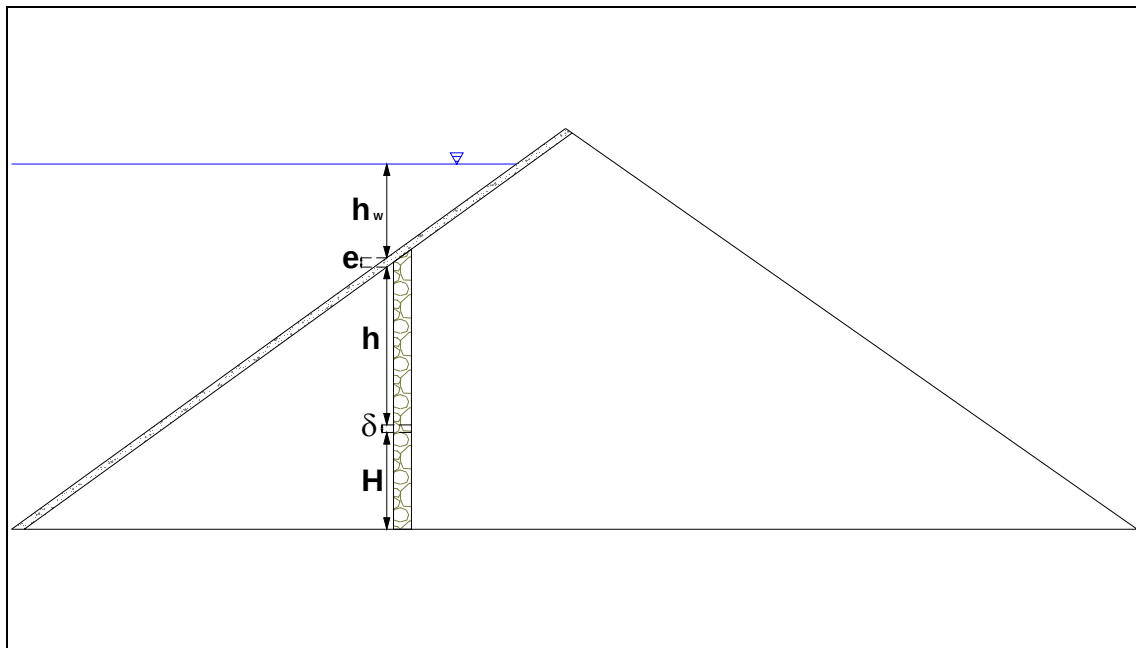


Fig. I.

17. Módulo de deformación propuesto por Penman.

El esfuerzo total calculado como se mencionó es una variable en la expresión de Penman:

$$E = 0,74 \frac{\sigma H}{\delta}$$

Donde:

D – Módulo de deformación.



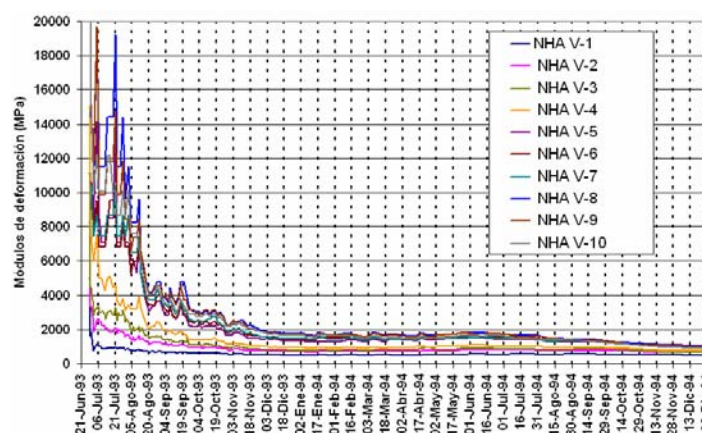
H – Altura del terraplén desde la elevación de la roca sana hasta al lugar de instalación del NHA.

σ – Esfuerzo vertical sobre el aparato.

δ – Asentamiento medido.

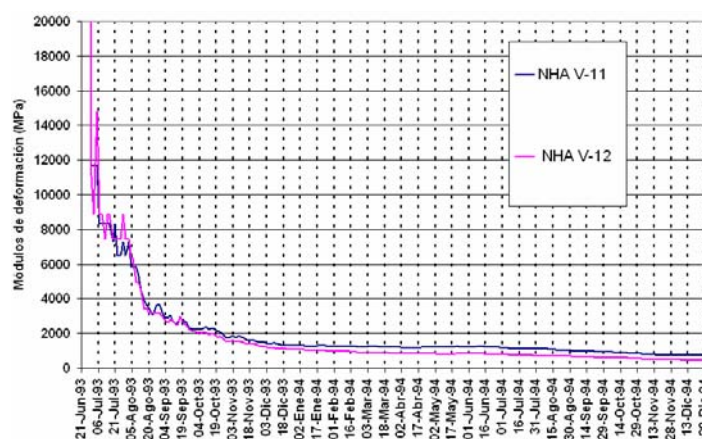
Los módulos de deformación obtenidos con esta fórmula tuvieron en los primeros días de llenado valores grandes debido a que en estas fechas las deformaciones medidas tuvieron magnitudes pequeñas (considerando su fecha base como la del primer llenado), posteriormente los valores se estabilizan llegando a valores cercanos a una constante; los resultados fueron los siguientes.

Los módulos calculados en el material 3B, a la elevación 90 tuvieron una variación entre 500 y 1100 MPa, entre 400 y 1100 MPa en la elevación 140 y entre 450 y 600 MPa en la elevación 180, sistemáticamente los valores más bajos se tuvieron en las zonas mas cercanas a la cara de concreto.



**Fig. I. 18. Módulos de deformación (Penman). Material 3B.
Sección L-18. Elev. 90 m.s.n.m.**

Los módulos calculados en el material T, en la elevación 90 variaron entre 400 y 900 MPa, entre 370 a 730 MPa en la elevación 140 y entre 300 y 400 MPa en la elevación 180, sistemáticamente los mayores valores del módulo se localizaron hacia aguas arriba.



**Fig. I. 19. Módulos de deformación (Penman). Material T.
Sección L-18. Elev. 90 m.s.n.m.**

Los módulos calculados en el material 3C, en la elevación 90 variaron entre 350 y 400 MPa, entre 200 y 310 MPa en la elevación 140 y entre 110 y 140 MPa en la elevación 180, sistemáticamente los mayores valores del módulo se localizaron hacia aguas arriba. Los



módulos calculados en el material 3C fueron los menores debido a la mayor deformabilidad de este material.

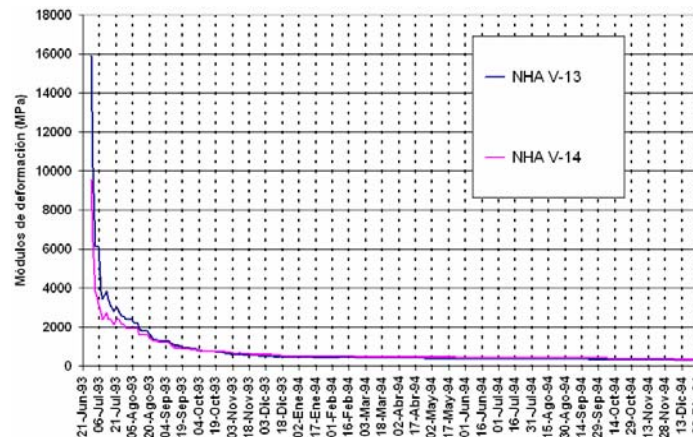


Fig. I. 20. Módulos de deformación (Penman). Material 3C.
Sección L-18. Elev. 90 m.s.n.m.

Las variaciones entre aparatos instalados en el mismo material son grandes por lo que resulta práctico obtener los promedios para dar una idea sobre la diferencia de la deformabilidad de cada material.

Tabla. I. 14. Módulos de deformación promedio (Penman).

Material	3B	T	3C
Módulo de deformación promedio (MPa)	809,7	511,1	249,5

Los resultados obtenidos con la expresión propuesta por Penman demuestran que los mayores módulos se presentaron en el material 3B, debido a la menor deformabilidad de éste, por el contrario para el material 3C se obtienen los menores módulos debido a que es el material más deformable del enrocamiento.

La expresión propuesta por Penman considera cargas en dirección vertical, pero la acción directa del embalse es en dirección normal a la cara de concreto, para analizar esto se utilizó la expresión de Fitzpatrick antes mencionada en los análisis del llenado de Aguamilpa:

La fórmula propuesta por Fitzpatrick es la siguiente:

$$E = \gamma_w \frac{H d_N}{\delta_N}$$

Donde:

E - Módulo de deformación.

γ_w - Peso volumétrico del agua.

H - Carga hidráulica del embalse desde la proyección del NHA en dirección normal a la cara de concreto.

d_N - Distancia del NHA a la roca sana en dirección normal a la cara de concreto.

δ_N - Desplazamiento en la dirección normal a la cara de concreto.

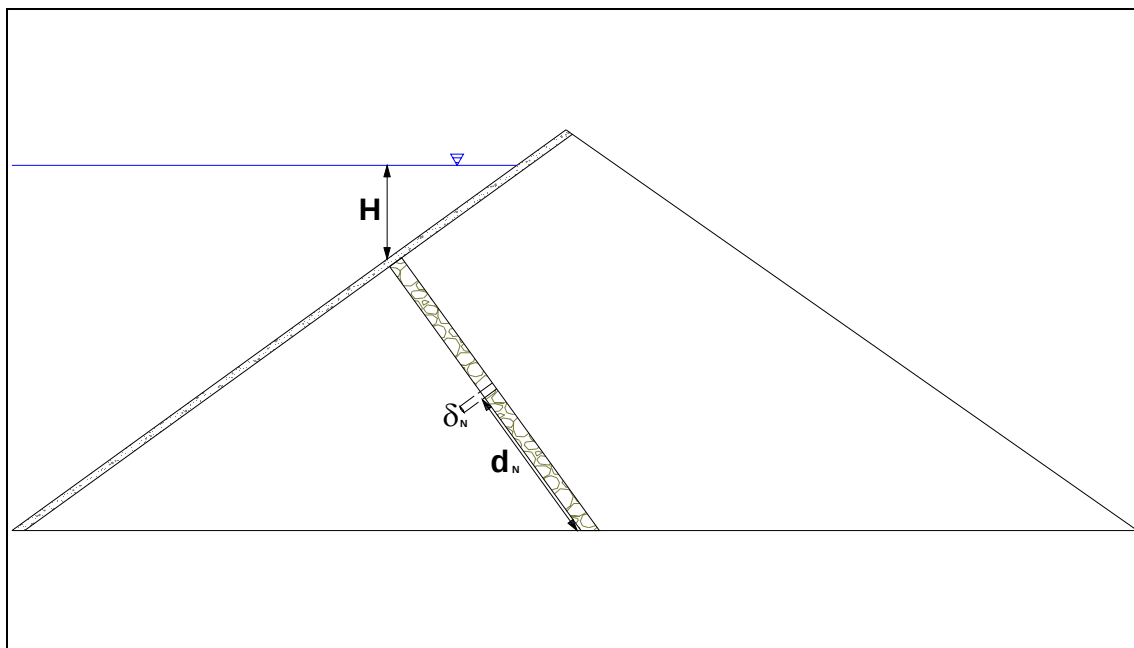


Fig.

I. 21. Módulo de deformación propuesto por Fitzpatrick.

En la figura anterior se muestran las variables consideradas en la fórmula de Fitzpatrick, los desplazamientos normales a la cara de concreto se obtienen a partir de los asentamientos medidos en NHA, con la siguiente expresión:

$$\delta_N = \frac{\delta_V}{\cos \theta}$$

Donde:

δ_N - Desplazamiento en la dirección normal a la cara de concreto.

δ_V - Asentamiento medido en NHA.

θ - Ángulo que forma la cara de concreto con la horizontal (aproximadamente 35° en El Cajón).

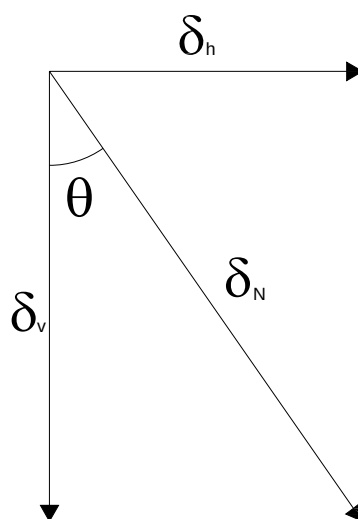


Fig. I. 22. Desplazamientos en el terraplén bajo la hipótesis de que la resultante es en dirección normal.



La expresión anterior se aplica haciendo la hipótesis de que la resultante del desplazamiento del terraplén es en la dirección normal, lo cual no se puede justificar con la información con la que se dispone, sin embargo, el análisis es útil para obtener una descripción cualitativa de los módulos de deformación durante el primer llenado, teniendo en cuenta que debido al error que se comete no es correcto considerar estos resultados como una descripción cuantitativa del comportamiento de la presa.

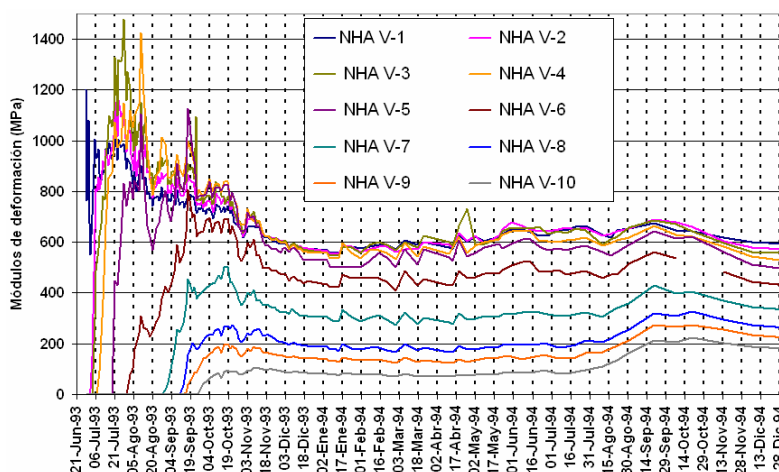
Como se puede observar en la figura I.21 la carga hidráulica se considera a partir de la cara de concreto y para tomar un punto de análisis sobre esta se debe proyectar una línea normal a la losa a partir del aparato en cuestión hasta esta, es decir, se considera el efecto del embalse con el punto de aplicación del empuje hidrostático.

Los resultados de los módulos de deformación con la expresión de Fitzpatrick comienzan a partir de que el embalse rebasa la proyección normal de la ubicación de cada NHA, esto es debido a que la fórmula está en función de la carga hidráulica respecto a este punto y para condiciones anteriores a dicha situación no se considera que exista una carga debida al embalse que afecte al aparato.

El análisis se realizó bajo la hipótesis de que los asentamientos son la componente vertical del desplazamiento normal en el terraplén, dicha suposición se explicará posteriormente, pero es necesario comentar que dada esta hipótesis los valores obtenidos solamente se pueden considerar de manera cualitativa y no cuantitativa.

El comportamiento obtenido bajo este análisis se explica a continuación:

Los módulos de deformación calculados a la elevación 90 para el material 3B indica que en los primeros aparatos que entregaron resultados, que fueron los mas cercanos a la cara de concreto, tuvieron valores iniciales menores a 1 500 MPa, a partir de noviembre de 1993 los valores se estabilizan y tienen un ligero incremento a mediados de agosto de 1994 debido a un aumento en el nivel del embalse. Los módulos al final del primer llenado variaron entre 230 y 700 MPa, siendo mayores para los aparatos ubicados en zonas cercanas a la cara de concreto.



**Fig. I. 23. Módulos de deformación (Fitzpatrick). Material 3B.
Sección L-18. Elev. 90 m.s.n.m.**

Un comportamiento similar se presentó en la 140, teniendo inicialmente un pico en las primeras fechas menor a 1 500 MPa, a excepción de la sección L-27 la cual presenta valores mayores, mostró un lapso casi constante durante el primer semestre de 1994 y un incremento después de agosto de este año, en este caso los módulos al final del llenado variaron entre 70 y 700 MPa. Los valores inferiores se obtuvieron debido a que tenía poco tiempo de actuar la carga hidráulica sobre los aparatos instalados hacia aguas abajo.



A la elevación 180, dado que fue poco el tiempo que el terraplén estuvo sujeto a los efectos de la carga hidráulica, los módulos calculados fueron menores y se obtuvieron valores a partir de septiembre de 1993. Sin embargo, el comportamiento demostrado a esta elevación es similar a las mencionadas anteriormente, pero con diferente magnitud de los módulos, en este caso, no rebasaron los 500 MPa y tuvo un rango de 16 a 460 MPa al final del primer llenado.

Los módulos de deformación calculados a la elevación 90 para el material T marcaron valores a partir de noviembre de 1993 con un periodo constante similar al mostrado por el material 3B, el cual termina en julio de 1994 cuando comienza a incrementarse hasta el final del llenado que llega a valores entre 34 y 152 MPa.

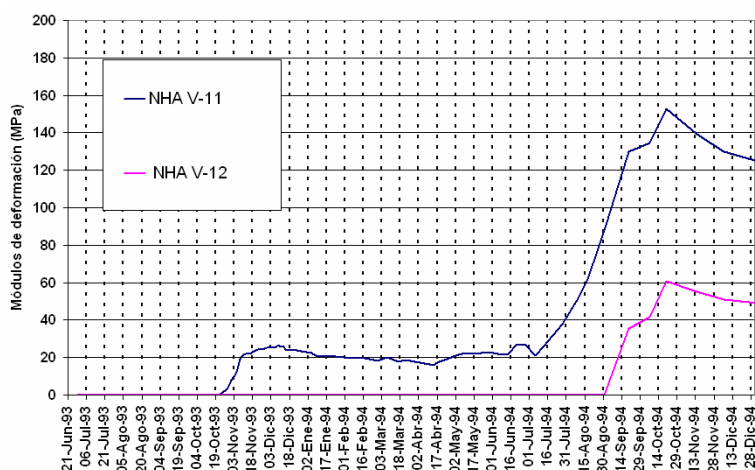


Fig. I. 24. Módulos de deformación (Fitzpatrick). Material T. Sección L-18. Elev. 90 m.s.n.m.

En la elevación 140 los módulos de deformación se calcularon a partir de agosto de 1994 debido a la elevación del embalse, por lo cual los valores obtenidos fueron pequeños, aproximadamente entre 40 y 60 MPa al final del llenado.

A la elevación 180 no se obtuvieron valores de los módulos de deformación debido a que el nivel del embalse no alcanzó las elevaciones de las proyecciones normales de los aparatos instalados en esta zona durante el llenado.

En el material 3C sucedió el mismo fenómeno que en el material T a la elevación 180, al no llegar el embalse al nivel de las proyecciones de los NHA sobre la cara de concreto el valor de los módulos es cero, debido a que la expresión de Fitzpatrick considera los desplazamientos normales debidos a la acción de la carga hidráulica sobre el terraplén.

En todos los casos los módulos de deformación fueron mayores en el material 3B, recordando que son los que están sujetos a mayor carga hidráulica y durante un periodo mayor de tiempo.

I.3.1.3.1 A partir de Inclínómetros.

En los inclinómetros es posible calcular los módulos de deformación en los tres materiales que constituyen el enrocamiento debido a que se encuentran instalados en cada material en las secciones L-18 y L-22, además de los instalados en el material 3B en las secciones L-10 y L-32.

El cálculo de los módulos a partir de los asentamientos medidos en los inclinómetros se realizó con la siguiente expresión propuesta por Penman:



$$E = 0,3 \frac{\gamma H^2}{S_{\max}}$$

Donde:

E - Módulo de deformación.

H – Altura del terraplén.

γ – Peso volumétrico del material.

$S_{\max}$ – Asentamiento máximo medido en el inclinómetro.

El comportamiento de los módulos de deformación es similar al obtenido para los NHA con la expresión de Penman:

- Material 3B.

En el material 3B se tienen inclinómetros que reflejan comportamiento similar entre sí, esto es debido a que por la altura del terraplén los instalados en las zonas centrales de la cortina tienen menor altura del terraplén y por lo tanto menores asentamientos de los que se encuentran cercanos a las márgenes.

Para los inclinómetros I-1 e I-4 ubicados en las secciones L-18 y L-22 respectivamente, se obtuvieron módulos de 830 MPa aproximadamente, al final del primer llenado.

Para los aparatos I-7 e I-8 los módulos calculados al final del llenado fueron de 460 y 560 respectivamente, ambos inclinómetros se encuentran instalados hacia las márgenes (secciones L-10 y L-32).

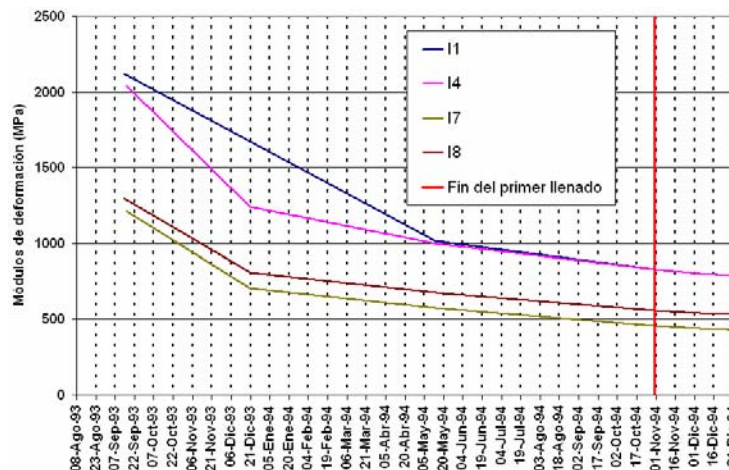


Fig. I. 25. Módulos de deformación con inclinómetros. Material 3B.

En el material T se calcularon los módulos de deformación con los inclinómetros I-2 e I-5 ubicados en las secciones L-18 y L-22 respectivamente obteniendo valores aproximados a 630 MPa para el I-2 y 605 MPa en el I-5.

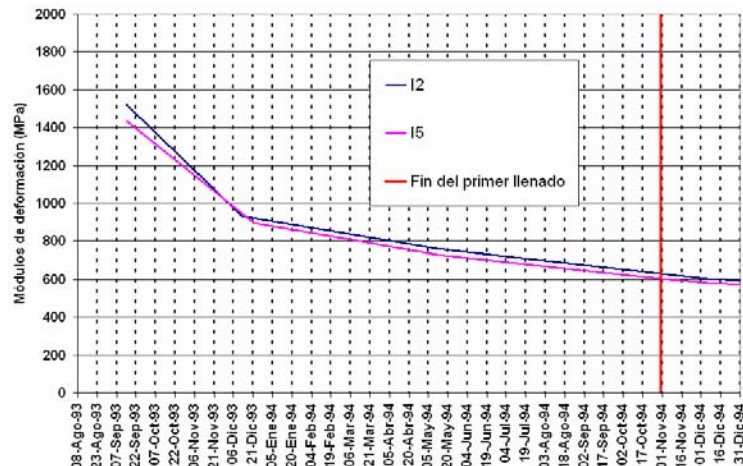


Fig. I. 26. Módulos de deformación con inclinómetros. Material T.

Los módulos de deformación en el material 3C fueron evaluados con los inclinómetros I-3 (L-18) e I-6 (L-22). Al final del primer llenado se calculó 320 MPa para el primero y 380 para el I-6.

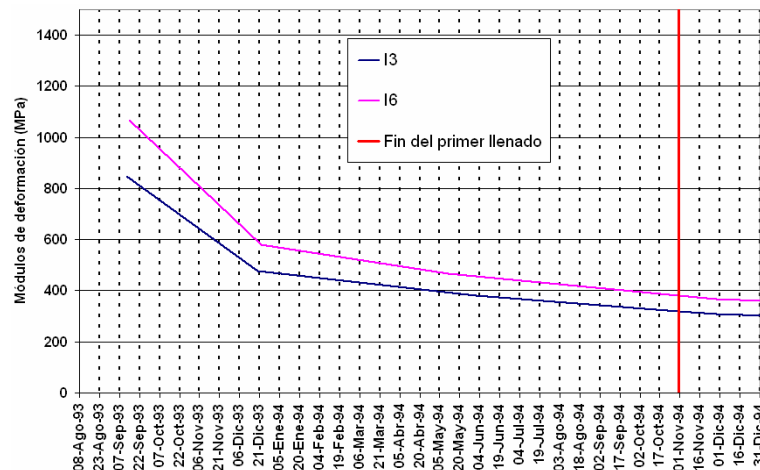


Fig. I. 27. Módulos de deformación con inclinómetros. Material 3C.

El material 3B tuvo mayores módulos de deformación, el material T presentó valores aproximadamente de dos tercios del obtenido con el 3B; en el material 3C se calcularon módulos menores a la mitad de los calculados en el material 3B.

I.3.1.3.3 A partir de Grupos de celdas de presión y extensómetros.

Estos aparatos en realidad son sistemas de instrumentos con los que se miden esfuerzos y deformaciones, son dispuestos en un arreglo de modo que sea posible medir esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z, y en ejes rotados a 45° en las direcciones XY, XZ y YZ.

El método para calcular los módulos de deformación con las mediciones registrados en los grupos de celdas de presión y extensómetros se resume a continuación, cabe mencionar que con dicho procedimiento es posible obtener tanto el módulo de deformación normal (E) como el módulo de deformación al corte (G).

A partir de las mediciones de esfuerzos y deformaciones en los aparatos que constituyen los grupos se obtienen los tensores esfuerzo y deformación con las siguientes expresiones.



$$\begin{aligned}\sigma_X &= S_X \\ \sigma_Y &= S_Y \\ \sigma_Z &= S_Z \\ \tau_{XY} &= \frac{-S_Y + S_Z}{2} + S_{ZY} \\ \tau_{XY} &= \frac{S_X + S_Z}{2} - S_{XZ} \\ \tau_{XY} &= \frac{-S_X + S_Y}{2} + S_{XY}\end{aligned}$$

Donde:

σ_i – esfuerzos normales del tensor de deformaciones.

τ_i – esfuerzos cortantes del tensor de deformaciones.

S_i – esfuerzos medidos en celdas de presión.

Con los resultados anteriores se puede formar el tensor deformaciones:

$$[T] = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{XY} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{XZ} & \tau_{YZ} & \sigma_Z \end{bmatrix}$$

Aplicando este procedimiento a las mediciones de los desplazamientos se obtiene el tensor deformaciones:

$$[E] = \begin{bmatrix} \varepsilon_X & \frac{1}{2}\gamma_{XY} & \frac{1}{2}\gamma_{XZ} \\ \frac{1}{2}\gamma_{XY} & \varepsilon_Y & \frac{1}{2}\gamma_{YZ} \\ \frac{1}{2}\gamma_{XZ} & \frac{1}{2}\gamma_{YZ} & \varepsilon_Z \end{bmatrix}$$

Donde:

ε_i – Deformaciones normales del tensor deformaciones.

γ_i – Deformaciones angulares del tensor deformaciones.

Para obtener los módulos de deformación es necesario calcular primero las componentes octaédricas de los esfuerzos y de las deformaciones, a su vez es necesario primero calcular los esfuerzos principales y las deformaciones principales.

Los esfuerzos principales son aquellos que actúan en planos donde los esfuerzos cortantes son nulos, es decir, se trata de esfuerzos normales puros, y en donde actúan se les llama planos principales.

En un plano principal el esfuerzo en un punto es igual al esfuerzo normal, debido a que, por definición, el esfuerzo cortante es nulo, entonces:



$$\bar{S} = \bar{\sigma}$$

Además, el vector esfuerzo es igual al tensor esfuerzo por el vector unitario.

$$\bar{S} = [T] \bar{n}$$

Y el vector esfuerzo normal es igual al esfuerzo normal por el vector unitario.

$$\bar{\sigma} = \sigma \bar{n}$$

Entonces

$$\sigma = \sigma \cos \alpha i + \sigma \cos \beta j + \sigma \cos \gamma k$$

Sustituyendo y desarrollando obtenemos:

$$\bar{\sigma} = [T] \bar{n}$$

$$\begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{Bmatrix}$$

Resultando el sistema de ecuaciones:

$$\sigma \cos \alpha = \sigma_x \cos \alpha + \tau_{xy} \cos \beta + \tau_{xz} \cos \gamma$$

$$\sigma \cos \beta = \tau_{xy} \cos \alpha + \sigma_y \cos \beta + \tau_{yz} \cos \gamma$$

$$\sigma \cos \gamma = \tau_{xz} \cos \alpha + \tau_{yz} \cos \beta + \sigma_z \cos \gamma$$

Despejando y factorizando obtenemos:

$$(\sigma_x - \sigma) \cos \alpha + \tau_{xy} \cos \beta + \tau_{xz} \cos \gamma = 0$$

$$\tau_{xy} \cos \alpha + (\sigma_y - \sigma) \cos \beta + \tau_{yz} \cos \gamma = 0$$

$$\tau_{xz} \cos \alpha + \tau_{yz} \cos \beta + (\sigma_z - \sigma) \cos \gamma = 0$$

El sistema anterior tiene tres ecuaciones y cuatro incógnitas ($\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$, σ); por lo que necesita de una ecuación más. Recordando que se trata de un vector unitario la otra ecuación será:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

Con la ecuación anterior se evita que la solución del sistema sea la trivial; para que exista una solución diferente a la trivial es necesario que el determinante del sistema sea igual a cero:

$$\det = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0$$



Desarrollando:

$$-\sigma^3 + (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2)\sigma + (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xy}\tau_{xz} - \tau_{yz}^2\sigma_x - \tau_{xy}^2\sigma_z - \tau_{xz}^2\sigma_y) = 0$$

La ecuación anterior se puede escribir:

$$-\sigma^3 + I_1\sigma^2 - I_2\sigma + I_3 = 0$$

Donde:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} = \text{Determinante del tensor esfuerzo.}$$

Los valores I_1 , I_2 e I_3 , reciben el nombre de invariantes del tensor esfuerzo, debido a que siempre tienen el mismo valor independientemente del sistema de referencia que se utilice.

I_1 - Invariante lineal

I_2 - Invariante cuádrico

I_3 - Invariante cúbico

La solución del sistema es un polinomio de tercer grado, las soluciones de éste son los esfuerzos principales:

σ_1 - esfuerzo principal mayor

σ_2 - esfuerzo principal intermedio

σ_3 - esfuerzo principal menor

Siendo $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

Las deformaciones principales son aquellas que actúan cuando las deformaciones angulares son nulas; para obtenerlas se realiza un procedimiento similar al usado para obtener los esfuerzos principales, teniendo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \cos \alpha \\ \varepsilon \cos \beta \\ \varepsilon \cos \gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{Bmatrix}$$

Desarrollando



$$\varepsilon \cos \alpha = \varepsilon_x \cos \alpha + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma_{xz} \cos \gamma$$

$$\varepsilon \cos \beta = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos \alpha + \varepsilon_y \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma_{yz} \cos \gamma$$

$$\varepsilon \cos \gamma = \frac{1}{2} \gamma_{xz} \cos \alpha + \frac{1}{2} \gamma_{yz} \cos \beta + \varepsilon_z \cos \gamma$$

Despejando y factorizando.

$$(\varepsilon_x - \varepsilon) \cos \alpha + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma_{xz} \cos \gamma = 0$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos \alpha + (\varepsilon_y - \varepsilon) \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma_{yz} \cos \gamma = 0$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{xz} \cos \alpha + \frac{1}{2} \gamma_{yz} \cos \beta + (\varepsilon_z - \varepsilon) \cos \gamma = 0$$

Como resultó en el análisis de los esfuerzos se necesita una ecuación más para tener un sistema de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas, y dado que se trata de un vector unitario, la cuarta ecuación es:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

El desarrollo posterior es similar al mostrado anteriormente por lo que se omitirá en esta tesis, únicamente se mencionarán los invariantes obtenidos a partir de dicho desarrollo:

$$I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$I_2 = \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_x \varepsilon_z + \varepsilon_y \varepsilon_z - \left[\frac{1}{2} \gamma_{xy} \right]^2 - \left[\frac{1}{2} \gamma_{yz} \right]^2 - \left[\frac{1}{2} \gamma_{xz} \right]^2$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{vmatrix} = \text{Determinante del tensor deformación.}$$

Los invariantes son coeficientes independientes del sistema de referencia, y también son los coeficientes del polinomio cuya solución son las deformaciones principales.

$$-\varepsilon^3 + I_1 \varepsilon^2 - I_2 \varepsilon + I_3 = 0$$

Donde,

I_1 - Invariante lineal

I_2 - Invariante cuadrático

I_3 - Invariante cúbico



La solución del polinomio de tercer grado nos permite conocer las deformaciones principales:

ε_1 - deformación principal mayor

ε_2 - deformación principal intermedio

ε_3 - deformación principal menor

Tanto los esfuerzos como las deformaciones principales actúan en los mismos ejes ortogonales entre si.

Si se traza un vector tal que su dirección forme el mismo ángulo con respecto a cada eje principal y sobre este se calcula la resultante de esfuerzo normal a partir de los esfuerzos principales, obtenemos una componente de esfuerzo conocida como esfuerzo octaédrico.

De igual modo en un plano normal a dicho vector actúa un esfuerzo cortante conocido como la componente octaédrica del esfuerzo cortante.

Dichas componentes se calculan a partir de los invariantes, con las siguientes expresiones:

$$\sigma_{oct} = \frac{I_1}{3}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{I_1^2}{3} + I_2 \right)}$$

La dirección en la que el esfuerzo normal octaédrico actúa es en la del vector $\bar{n}$, siendo el vector $\bar{n}$:

$$\bar{n} = \frac{1}{\sqrt{3}}i + \frac{1}{\sqrt{3}}j + \frac{1}{\sqrt{3}}k$$

De tal modo que los cosenos directores de dicho vector son iguales:

$$\cos \alpha = \cos \beta = \cos \gamma$$

Por otro lado, el esfuerzo cortante actúa en un plano perpendicular al vector $\bar{n}$, como se muestra en la siguiente figura:

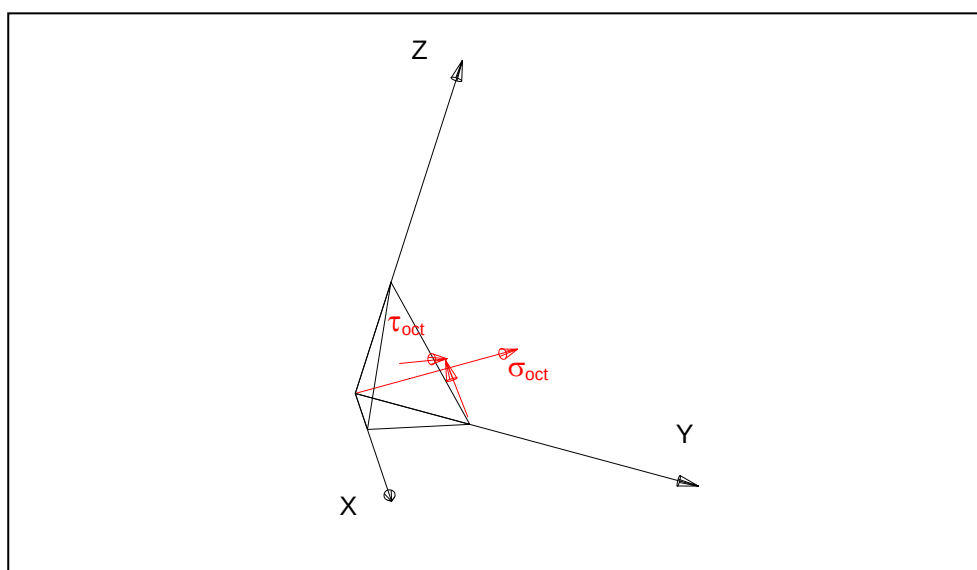


Fig. IV.
28.

Componentes octaédricos de los esfuerzos principales.

Las componentes octaédricas de las deformaciones (ϵ , deformación normal y γ , deformación angular), se obtienen con el procedimiento explicado para los esfuerzos octaédricos.

Por lo anterior explicado se obtienen para cada lectura tomada en todos los aparatos un par ordenado (ϵ, σ) y un par ordenado (γ, τ) al hacer una regresión lineal para ambos casos se obtienen para el primero el módulo de deformación normal E, y para el segundo caso el Módulo de deformación al corte G.

Para este análisis únicamente se pueden utilizar los aparatos que tengan todas las componentes para calcular los tensores deformaciones y esfuerzos, otra limitante es que las cargas debidas al embalse se hacen presente hasta el momento en el que el nivel del agua rebasa la elevación de la intersección entre una recta normal a la cara de concreto que pasa por el grupo de aparatos y la cara de concreto, de modo similar al cálculo con la expresión de Fitzpatrick.

Las condiciones anteriores determinaron los resultados de este análisis llegando a los resultados que se comentarán a continuación, es preciso antes de mencionar los resultados indicar, cuales fueron los aparatos que realmente se tomaron en cuenta y durante que periodos por medio de la siguiente tabla.

Tabla. I. 15. Periodo en la cual los grupos estuvieron bajo la carga del embalse.

Sección	Grupo	Elevación de la intersección de la recta normal y la cara de concreto (msnm)	Elevación de los aparatos (msnm)	Periodo bajo el efecto del embalse
L-18	12	185.64	90.89	18/sep/93 a 31/oct/94
	17	200.58	139.32	11/ago/94 a 31/oct/94
	20	212.45	177.62	18/sep/94 a 31/oct/94
L-22	8	195.41	83.44	11/nov/93 a 31/oct/94
	15	202.99	107.87	21/ago/94 a 31/oct/94
	19	220.47	156.17	-
	21	229.55	194.42	-



Como se observa los grupos 19 y 21 no estuvieron bajo el efecto del embalse durante el primer llenado, únicamente fueron afectados los grupos 12, 17, 20, 8 y 15, sin embargo, no todas las mediciones fueron completas durante esta etapa, pues al faltar una sola componente no se puede calcular el valor real octaédrico, tomando en cuenta esto, los únicos grupos que se pudieron analizar fueron: G-12 y G-17.

El grupo 12 se localiza sobre la sección L-18 a la elevación 90,89, en la primer plataforma de instrumentación. Las lecturas que se consideraron para el periodo del primer llenado fueron entre el 18 de septiembre de 1993 y el 31 de octubre de 1994 (fin del llenado).

En las gráficas siguientes se encuentran esfuerzos contra deformaciones unitarias, al hacer una regresión lineal con la dispersión de los puntos de esfuerzos y deformaciones octaédricas se obtiene la ecuación de una recta cuya pendiente corresponde al módulo de deformación E ó G, según sea el caso.

Para los esfuerzos y deformaciones unitarias normales el módulo de deformación E calculado fue de 3 593,83 MPa. Mientras para los esfuerzos cortantes y deformaciones angulares se obtuvo el módulo de deformación al corte G de 1 862,52 MPa.

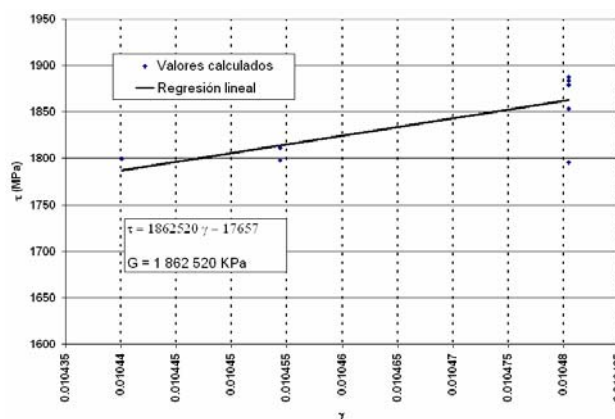


Fig. I. 29. Módulos de deformación cortante G, en el Grupo de celdas de presión y extensómetros G-12.

En el grupo de celdas de presión y extensómetros G-17 se consideraron las lecturas entre el 11 de agosto de 1994 y el final del primer llenado, no obstante, no fue posible calcular el módulo E, debido a que pocas mediciones dentro de este periodo cuentan con lecturas en todas las direcciones de las celdas de presión y las que se utilizaron no mostraron una tendencia clara.

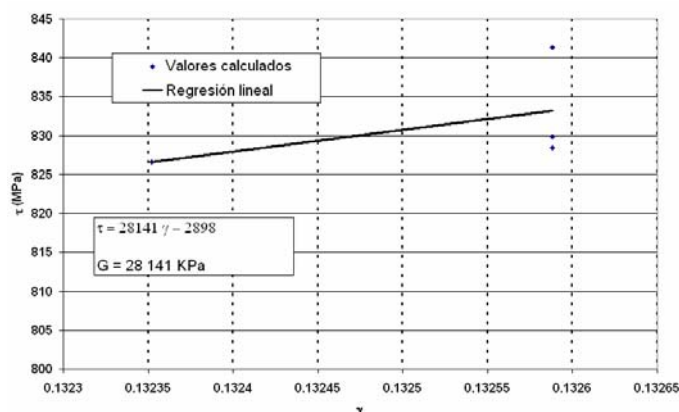


Fig. I. 30. Módulos de deformación cortante G, en el Grupo de celdas de presión y extensómetros G-17.



Estos aparatos están ubicados en la sección L-18 a la elevación 139,32 (segunda plataforma de instrumentación), su periodo bajo el efecto del embalse fue menor que en el grupo G-12 y el valor obtenido de G fue de 28,14 MPa, considerablemente menor al del G-12.

Todos los grupos instalados en Aguamilpa fueron dispuestos dentro del material 3B, por lo que no es posible comparar el comportamiento entre los materiales de la cortina, pero si serán comparables posteriormente con resultados obtenidos en la presa El Cajón.

I.3.2. Niveles de agua.

I.3.2.1. Niveles piezométricos.

Los niveles de agua dentro del terraplén de Aguamilpa se pudieron medir a través de las secciones L-18 y L-22, con piezómetros neumáticos y los niveles dentro de los tubos de los inclinómetros (funcionando como piezómetros abiertos), para complementar esta información se colocó una galería de filtraciones al pie de la cortina que mide el gasto filtrado a través del terraplén. Los piezómetros neumáticos dejaron de funcionar antes del término del primer llenado, quedando únicamente para la lectura los niveles en los inclinómetros.

Los niveles de agua dentro del terraplén están regidos por el nivel del piso de la galería de drenaje (72,92 m).

En la sección L-18 se midieron niveles entre 68 y 70 m.s.n.m. al inicio del primer llenado, inmediatamente después de esta fecha la tendencia cambia abruptamente el 10 de julio de 1993 con un incremento de 4 m en el nivel. Posteriormente los niveles se mantuvieron estables hasta el momento que el embalse rebasó la elevación 205, a finales de agosto de 1994, para esta fecha la mayoría de los piezómetros neumáticos no reportaban mediciones, pero con los registros en los inclinómetros se detectó otro cambio súbito para llegar a niveles máximos de 76.3 m.s.n.m en el tubo del I-1, debido a filtraciones en el terraplén. Para el final del primer llenado los niveles fueron decreciendo lentamente con el máximo de 76 m en el inclinómetro I-1.

Además de los piezómetros neumáticos que se graficaron en la siguiente figura también se encontraban instalados los aparatos PN-10, 11 y 12 en la sección L-18, los cuales fueron omitidos dado que el bulbo de los tres se localiza alrededor de la elevación 95 (nivel superior al del agua dentro del terraplén).

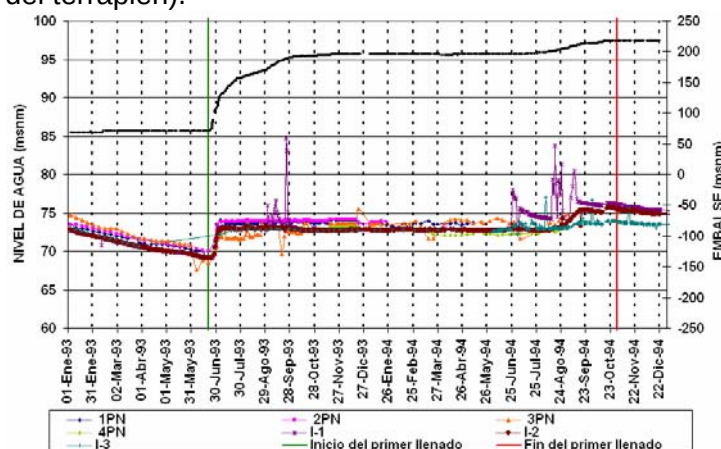


Fig. I. 31. Niveles de agua. Sección L-18.

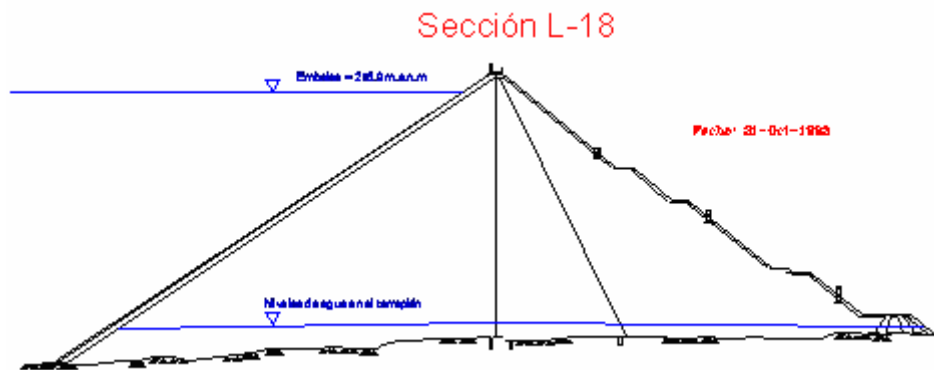


Fig. I. 32. Niveles de agua al final del primer llenado. Sección L-18.

En la Sección L-22 sucede un fenómeno similar al de la L-18, al inicio del primer llenado cambia el nivel bruscamente de entre 69 y 71 m hasta 73 y 75 m para el 9 de julio de 1993.

Esta sección también tuvo un periodo estable durante la mayor parte del llenado con un brinco en las mismas fechas que en la sección L-18, en este caso el máximo se presentó a mediados de octubre de 1994 y fue de 76 m, nivel que se mantuvo hasta el final del primer llenado, el cual se asocia a filtraciones en el terraplén.

En la sección L-22 también se instalaron los piezómetros neumáticos PN-13, 14 y 15 los cuales se encuentran a la elevación 95 cota superior al nivel del agua dentro del terraplén y por lo cual no fueron graficados.

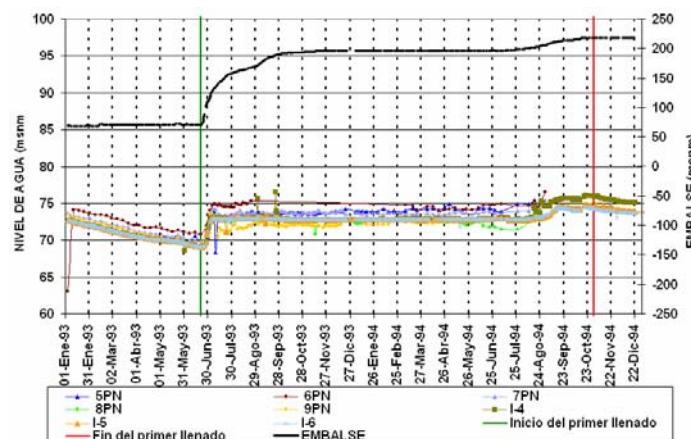


Fig. I. 33. Niveles de agua. Sección L-22.

I.3.2.2. Filtraciones en la cortina.

Al pie de la cortina se construyó una galería para poder captar las filtraciones y aforarlas, el aumento de dichas filtraciones no significan un riesgo para la seguridad de la estructura, sin embargo, en ocasiones si pueden generar problemas por cuestiones de operación.

Durante el inicio del primer llenado el gasto medido en la galería de filtraciones no rebasó los 70 L/s, entre los meses de octubre de 93 y julio de 94 el gasto fue menor a 13 L/s, pero al rebasar el embalse la elevación 205 (agosto de 1994), el gasto se disparó hasta llegar al máximo de 258 L/s a finales de octubre.

Por medio de inspecciones se determinó que la causa de estas filtraciones fueron la falta de sellado de tres barrenos de inyección del plinto dos a la elevación 218 y uno a la elevación 215.

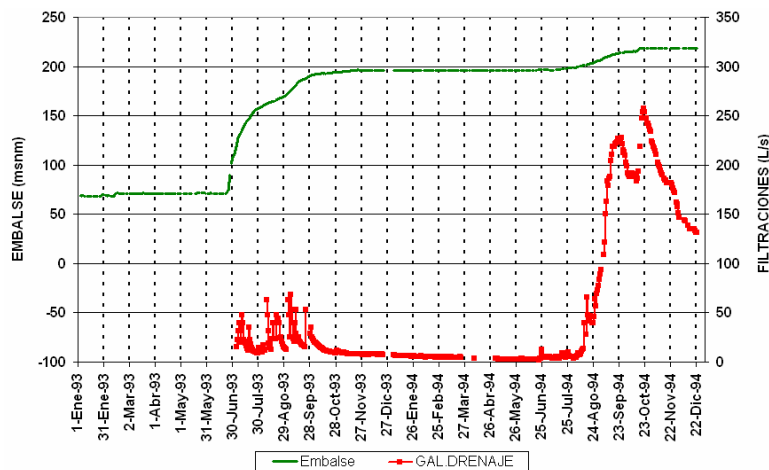


Fig. I. 34. Filtraciones al pie de la cortina.

I.3.3. Deformaciones en las losas de concreto.

Las deformaciones en la cara de concreto que se estudiaron fueron: asentamientos y desplazamientos horizontales, los desplazamientos entre las losas, los desplazamientos entre losa y plinto, y las deformaciones de la cara de concreto a lo largo de cuatro secciones de estudio (L-10, L-18, L-22 y L-32).

I.3.3.1. Deformaciones medidas en referencias topográficas.

En la línea de referencias L-1 instalada en la elevación del talud de aguas arriba (elev. 229, aguas arriba, se midieron 2,5 cm de asentamiento máximo el día 4 de noviembre de 1994 en la sección de la losa L-20; se notan menores asentamientos hacia margen izquierda, donde el terraplén tiene menor altura para esta sección longitudinal.

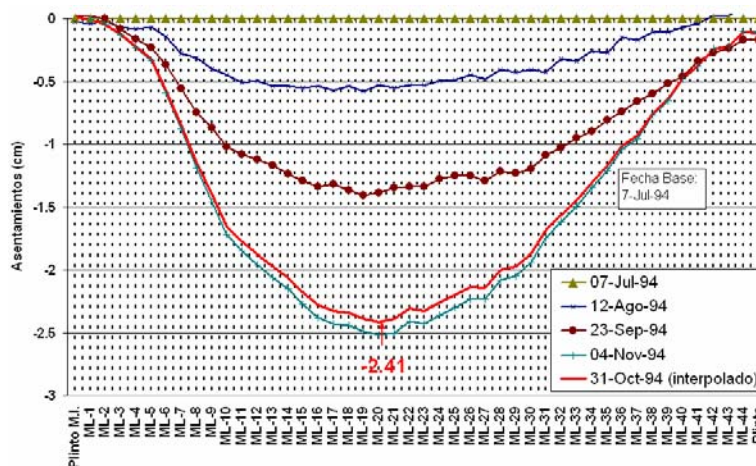


Fig. I. 35. Asentamientos en referencias topográficas aguas arriba.
L-1. Elev. 229.

El desplazamiento mayor en la línea de referencias L-1 fue de 4,9 cm con dirección hacia aguas abajo. En este caso el valor máximo se definió en la zona central de la cortina (sección losa L-17).

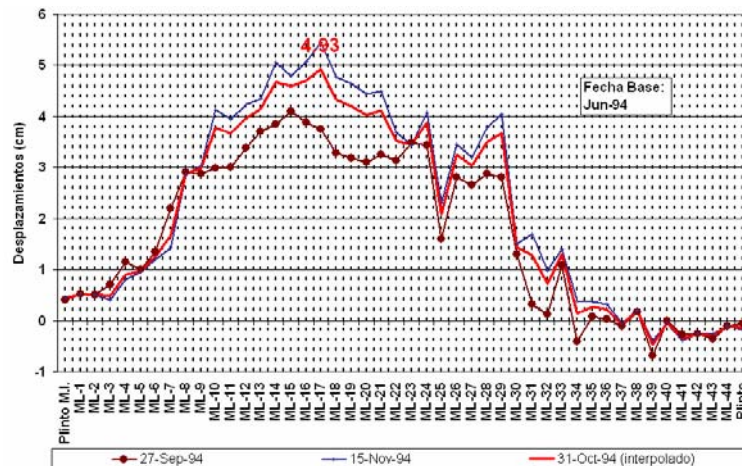


Fig. I. 36. Desplazamientos horizontales aguas arriba.
L-1. Elev. 229.

I.3.3.2. Desplazamientos en juntas losa-plinto.

En total se colocaron 19 extensómetros tridimensionales a lo largo de la junta losa-plinto, estos aparatos pueden medir los desplazamientos en tres direcciones.

Dirección de apertura o cierre entre la losa y el plinto (A), mide los desplazamientos de apertura o cierre entre estos dos elementos. Al final del primer llenado el máximo desplazamiento fue de apertura en la losa L-18 de 15,28 mm, la ubicación de esta losa es al centro del cauce y es la que esta sujeta a mayor carga hidráulica.

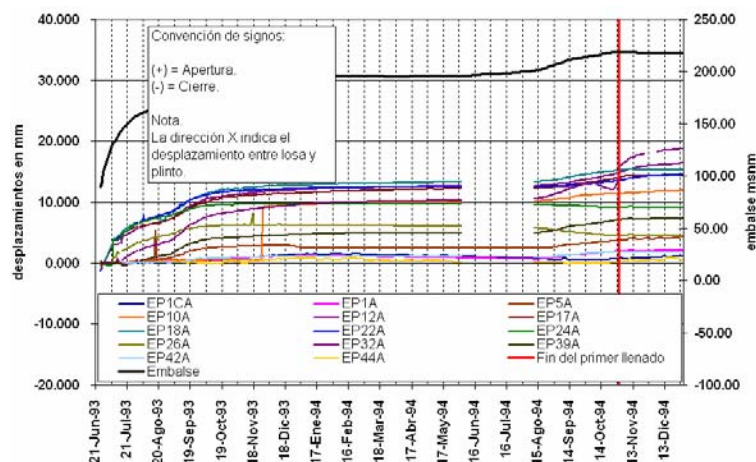


Fig. I. 37. Desplazamientos de apertura o cierre (A). Juntas losa-plinto.
Extensómetros tridimensionales.

Dirección tangencial a la losa de concreto (T) mide desplazamientos a lo largo del cauce de deslizamiento entre losa y plinto en dirección tangente a la cara de concreto. El mayor desplazamiento registrado fue de 5,43 mm en la losa 24 ubicada en la zona central hacia la ladera derecha. Estos desplazamientos dependen en gran medida de la topografía del cauce.

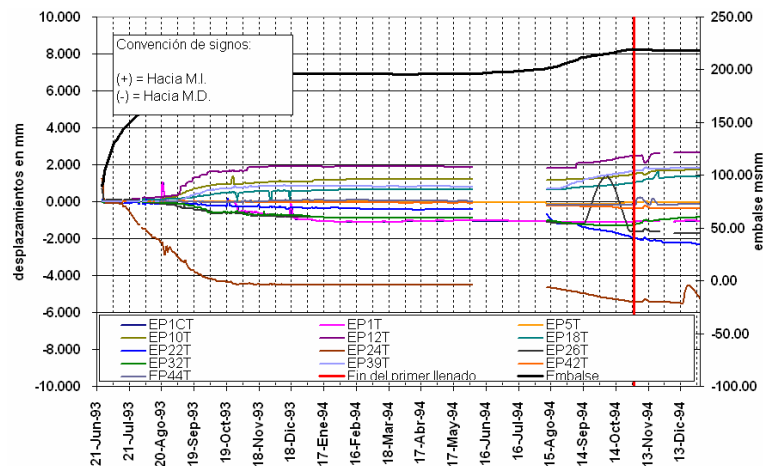


Fig. I. 38. Desplazamientos en dirección tangencial (T). Juntas losa-plinto. Extensómetros tridimensionales.

Dirección normal a la losa de concreto (N) que mide los asentamientos o los bufamientos en la losa de concreto (dirección normal a la losa). Todos los instrumentos presentaron asentamientos a excepción de los ubicados en las márgenes, donde marcaban pequeños bufamientos con valor máximo de 0,7 mm en la losa L-1 en margen izquierda y 0,3 mm en la losa 44 en margen derecha.

Los demás aparatos presentaron asentamientos y el valor máximo de 15,62 mm se ubicó en la losa L-26, al centro del cauce, hacia margen derecha.

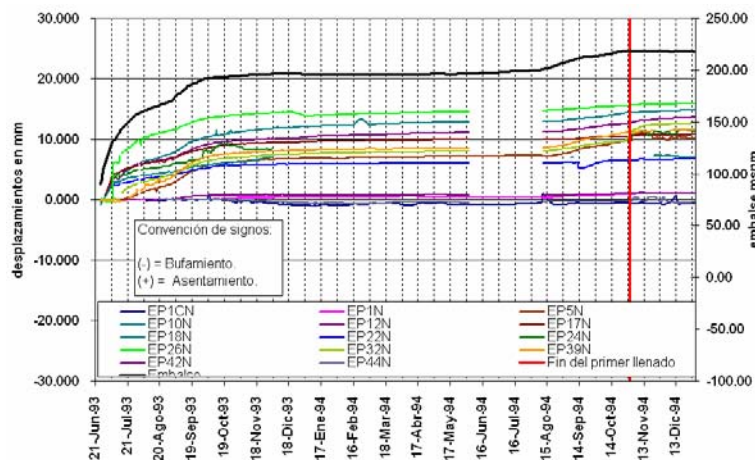


Fig. I. 39. Desplazamientos en dirección normal (N). Juntas losa-plinto. Extensómetros tridimensionales.

I.3.3.3. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.

Los desplazamientos en las juntas verticales de las losas fueron obtenidos con medidores de juntas unidireccionales ubicados a diferentes elevaciones en zonas cercanas al plinto.

Para efecto de esta Tesis solamente se tomaran en cuenta los que se localizan a la elevación 195 en ambas márgenes, dado que son los únicos comparables con los aparatos instalados en el P. H. El Cajón. La ubicación de dichos medidores de juntas se muestra en la siguiente tabla.



Tabla I.16. Medidores de junta. Elevación 195.

Margen	Aparato	Losas
Izquierda	MJE EL-01/195	1 y 2
	MJE EL-02/195	2 y 3
	MJE EL-03/195	3 y 4
	MJE EL-04/195	4 y 5
	MJE EL-05/195	5 y 6
	MJE EL-06/195	6 y 7
	MJE EL-07/195	7 y 8
	MJE EL-08/195	8 y 9
	MJE EL-09/195	9 y 10
Derecha	MJE EL-34/195	34 y 35
	MJE EL-35/195	35 y 36
	MJE EL-36/195	36 y 37
	MJE EL-37/195	37 y 38
	MJE EL-38/195	38 y 39
	MJE EL-39/195	39 y 40
	MJE EL-40/195	40 y 41
	MJE EL-41/195	41 y 42

Al final del primer llenado, en la margen izquierda los desplazamientos fueron de apertura a excepción de la junta formada por las losas L-9 y L-10 el cual tuvo un valor de 0,7 mm de cierre, esto debido a que estas losas se encuentran cercanas a la zona de compresiones, por otro lado el valor de desplazamientos máximo fue en las losas L-7 y L-8 con 5,3 mm de apertura.

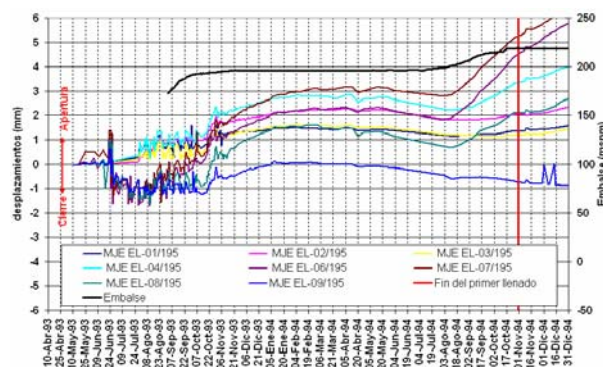


Fig. I. 114. Medidores de juntas unidireccionales. Elev. 195. Margen izquierda.

En la margen derecha todas las juntas presentan tendencia la apertura y el máximo desplazamiento fue entre las losas L-38 y L-39 con 4,9 mm.

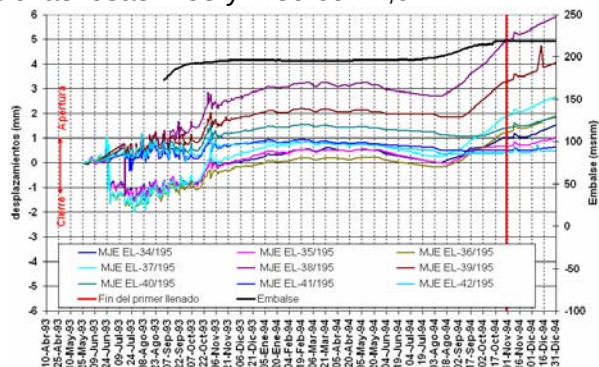


Fig. I. 115. Medidores de juntas unidireccionales. Elev. 195. Margen derecha.

En ambas márgenes el movimiento predominante fue la apertura y la magnitud mayor de dichos desplazamientos fueron en la zona central de cada franja de aparatos, lo que lleva a pensar que esta fue la zona de mayores tensiones.

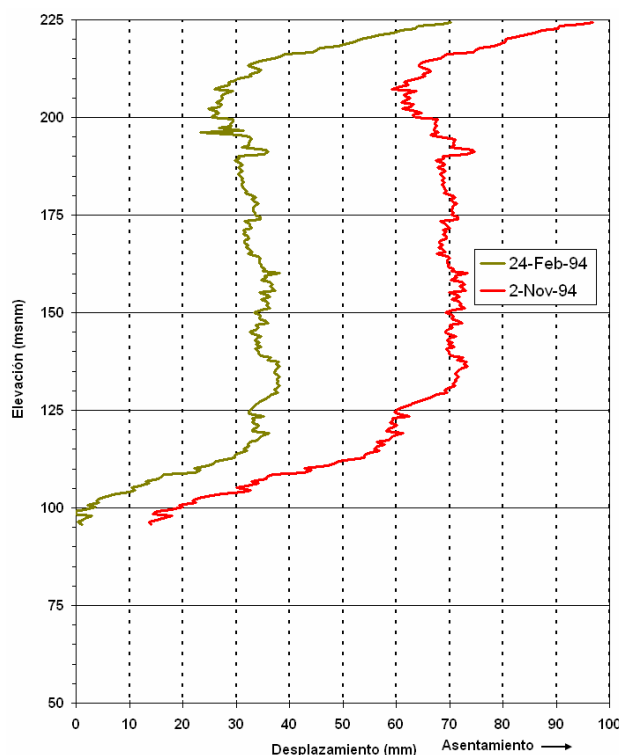


I.3.3.4. Desplazamientos normales a la cara de concreto.

Inclinómetros inclinados.

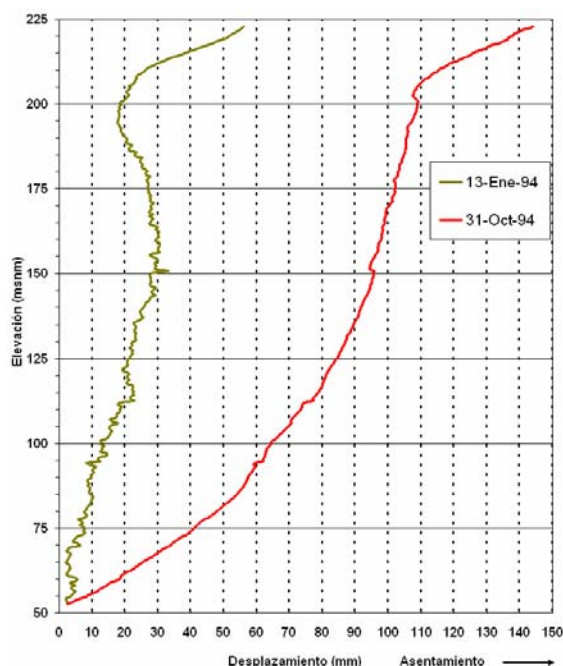
Los desplazamientos de la cara de concreto en dirección normal a esta, se midieron con inclinómetros colocados en la losa con la misma inclinación. Los inclinómetros inclinados se instalaron en cuatro losas: L-10, L-18, L-22 y L-32. Los desplazamientos que se muestran tienen fecha base la del inicio del primer llenado.

En la sección L-10 se puede notar que la losa estuvo trabajando con doble curvatura, una a partir del desplante y el cambio de curvatura aproximadamente a la elevación 213, el máximo desplazamiento fue en la boquilla del aparato con el valor de 22,4 cm al día 2 de noviembre de 1994.



**Fig. I. 116. Desplazamientos normales a la losa de concreto.
Sección L-10. Inclinómetros inclinados.**

En la losa L-18 se marca la misma doble curvatura que en la sección L-10, pero en este caso cambia de curvatura aproximadamente a la elevación. 200; su desplazamiento máximo es de 14,3 cm en la boquilla del aparato.



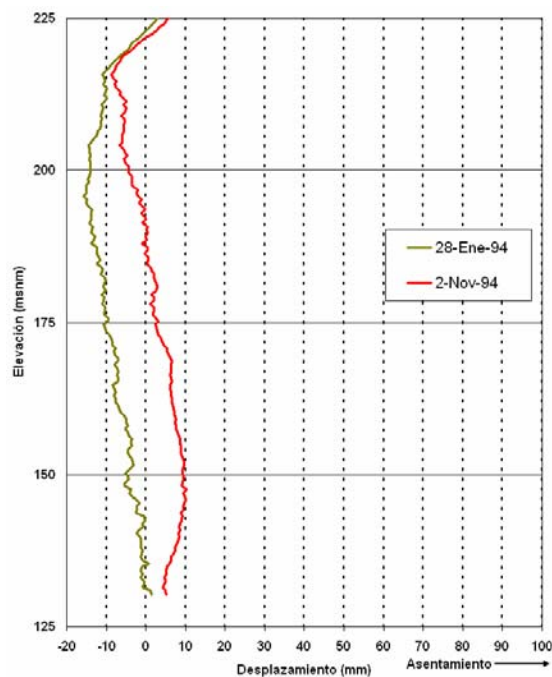
**Fig. I. 117. Desplazamientos normales a la losa de concreto.
Sección L-18. Inclínómetros inclinados.**

En la sección L-22 el desplazamiento es diferente a las otras dos anteriores, ésta muestra triple curvatura; la primera desde el desplante hasta la elevación 114, marcando un bufamiento de 16 mm, la segunda a partir de esta elevación y hasta la 205 y la tercera hasta la boquilla donde se tiene el mayor desplazamiento que es de 6 cm.



**Fig. I. 118. Desplazamientos normales a la losa de concreto.
Sección L-22. Inclínómetros inclinados.**

El cuarto inclinómetro colocado en losa de concreto fue el que se encuentra en la sección L-32, también mostró doble curvatura, la primera desde su desplante hasta la elev. 216 y la segunda de ahí a la boquilla; en este caso el mayor desplazamiento fue de 10,2 mm a la elev. 148.



**Fig. I. 119. Desplazamientos normales a la losa de concreto.
Sección L-32. Inclínómetros inclinados.**

Las mediciones obtenidas con los inclinómetros inclinados fueron muy útiles para poder determinar las zonas donde se generaron las filtraciones al terraplén y también para estudiar como afectan las deformaciones del terraplén a la cara de concreto.



II GENERALIDADES DEL P.H. EL CAJÓN

II.1. Datos Generales

II.1.1. Ubicación.

El Proyecto Hidroeléctrico El Cajón forma parte del Sistema Hidrológico Santiago, en el que se encuentran: las centrales hidroeléctricas Aguamilpa, Santa Rosa y próximamente La Yesca. El Cajón se localiza a 47 Km al oriente de la Ciudad de Tepic.

Su embalse se ubica a 60 km aguas arriba de Aguamilpa, en los municipios de La Yesca y Santa María del Oro, en los terrenos comunales del poblado Cantiles.



Fig. II.1. Ubicación del P. H. El Cajón, Nay.

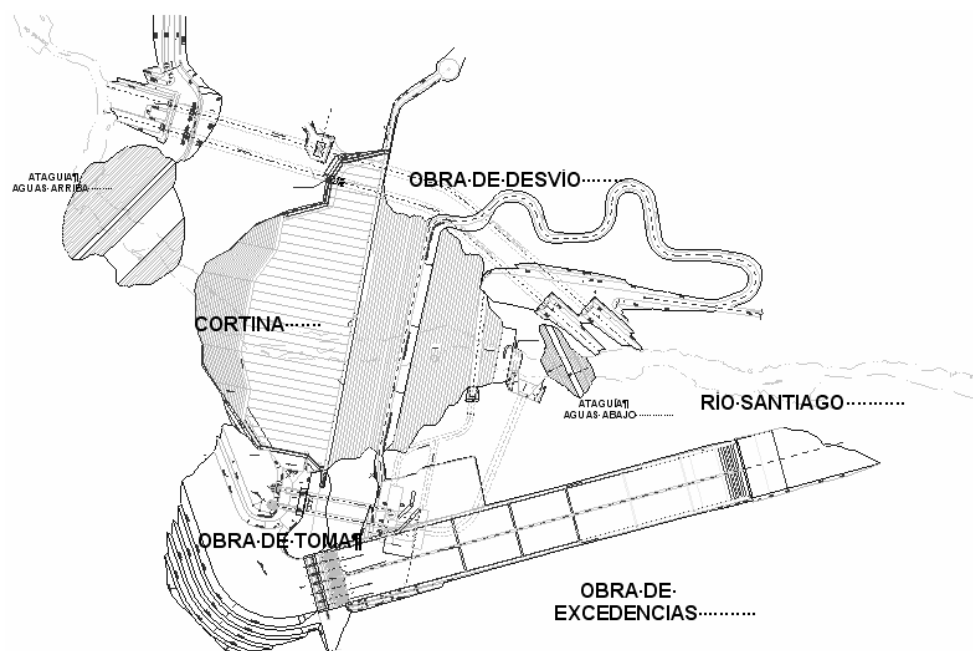


Fig. II.2. Esquema general del P. H. El Cajón, Nay.



En la siguiente tabla se resumen los aspectos hidrológicos más importantes que se tomaron en cuenta para el diseño de las obras que conforman el proyecto. Para el análisis hidrológico se consideraron datos registrados desde 1949

Tabla II.1. Datos hidrológicos y elevaciones de diseño.

Área de la cuenca	54 198 km ²
Volumen de escurrimiento medio anual histórico (1949-1999)	4 026 hm ³
Volumen medio aprovechable	3 166 hm ³
VMA menos usos y retornos futuros (1998-2046)	3 326 hm ³
Gasto medio aprovechable (1998-2046)	105 m ³ /s
Gasto de la avenida de diseño para desvío	7 029 m ³ /s
Gasto de la avenida de diseño para vertedor	14 864 m ³ /s
Elevación al NAMINO	346,0 m
Elevación de diseño (corresponde a la carga de diseño de la turbina)	380,07 m
Elevación al NAMO	391,0 m
Elevación al NAME	394,0 m
Capacidad para azolve (El. 319.50)	482,4 hm ³
Capacidad útil para generación	1316,2 hm ³
Capacidad de control de avenidas	117,5 hm ³
Área al NAME	3982,0 ha
Área al NAMO	3852,0 ha
Área al NAMINO	2087,0 ha

Para conocer la geología del sitio se excavaron cuatro socavones y varias trincheras en las márgenes del río, así como también se realizaron estudios de los bancos de materiales para definir los parámetros de resistencia, deformación y permeabilidad del macizo rocoso. Con estos estudios se determinó que la boquilla tendría como marco geológico roca ignimbrita que fue distinguida en tres unidades (TicU1, TicU2 y TicU3), entre estas unidades se localizaron dos horizontes aglomeráticos, entre las unidades 1 y 2 se encontró uno de 5 m; y en la unidad 2 otro de entre 22 y 25 m.

II.1.2. Descripción de la obra de contención.

La cortina es del tipo de enrocamiento con cara de concreto de 188 m de altura, 550 m de longitud de corona, el talud aguas arriba tiene una pendiente 1,4:1 y el talud aguas abajo 1,5:1; las losas tienen un ancho de 15 m en la zona central y 7,5 en los extremos, y espesor variable. La losa de concreto está apoyada en el plinto, estructura que cumple con la función de apoyo de la pantalla y como plataforma para las inyecciones de consolidación.

Tabla II.2. Materiales del terraplén.

Material	Función	Volumen (m ³)
2F	Filtro bajo juntas de tensión	7 930
2	Soporte de losa	358 651
3A	Filtro / transición entre 2 y 3B	232 496
3B	Enrocamiento principal	3 269 511
T	Transición	3 434 423
3C	Respaldos de aguas abajo	3 418 466
4	Enrocamiento de protección	159 956
Volumen total		10 881 433



Tabla II.3. Datos generales de las obra de contención.

Tipo	Enrocamiento con cara de concreto (CFRD)
Elevación de la corona	394,5 m
Elevación máxima del parapeto	396,0 m
Elevación máxima de terracerías (aguas arriba)	392,0 m
Elevación máxima de terracerías (aguas abajo)	393,0 m
Longitud de la corona	550,0 m
Altura total al desplante	188,0 m
Elevación de desplante	208,0 m
Altura bordo libre	2,0 m
Talud aguas arriba	1,4 :1
Talud aguas abajo	1,4 :1

En las juntas de tensión se colocaron sellos para evitar filtraciones a través de éstas durante el primer llenado y operación. Los sellos son de diferentes tipos dependiendo la junta en donde son colocados.

Los sellos colocados en las juntas losa-plinto constan de tres partes esenciales: dos sellos de cobre, uno inferior colocado entre el material de recargue y la losa en un extremo y colado en el plinto en el otro, y el otro superior colocado sobre la losa y el plinto. Estos sellos de cobre fueron rolados para poder soportar aberturas máximas de 15 cm.

El tercer elemento es un contenedor de cenizas volantes, su objetivo es, en caso de filtraciones el flujo arrastraría a las cenizas las cuales van a actuar como material sellante.

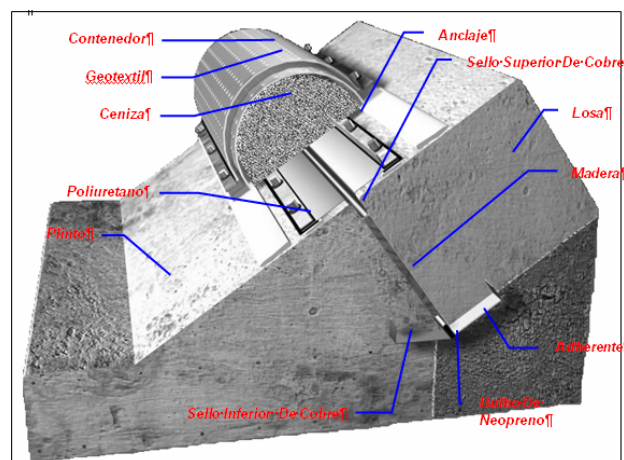


Fig. II.3. Sello junta losa-plinto.

En el caso de las juntas losa-losa el arreglo de los sellos fue similar al anterior con dos sellos de cobre (superior e inferior) y el contenedor de ceniza volante.

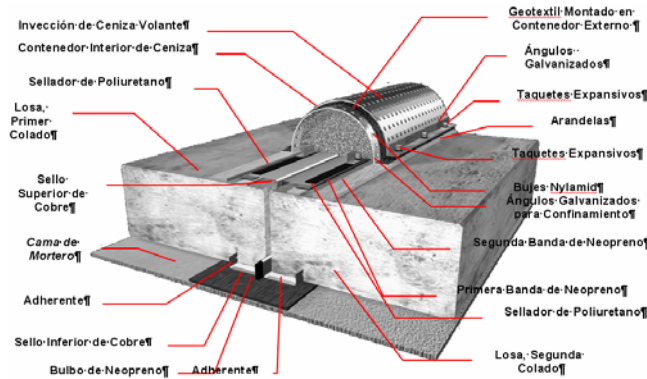


Fig. II.4. Sello junta losa-losa.

II.2. Aspectos del diseño de la cortina.

En el diseño de la cortina de El Cajón participaron la Subgerencia de Geotecnia y Materiales de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de CFE (SGM-GEIC, CFE) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM).

En el caso de Aguamilpa se tomó gran importancia en que el módulo de deformación del material 3B fuera grande sin darle la debida atención a los materiales T y 3C, teniendo como resultado que la relación de módulos del material 3B respecto a los materiales T y 3C fueran de 3 y 6 veces respectivamente.

Tomando en cuenta que en Aguamilpa se generaron agrietamientos en la cara de concreto por los asentamientos diferenciales entre los materiales 3B y 3C, en el diseño de El Cajón se buscaron condiciones de deformabilidad muy similares entre estos materiales.

El diseño de los taludes de la cortina se hace en base a la experiencia. Comúnmente se asignan taludes 1,4:1 en enrocamientos de buena calidad y zonas entre media y baja sismicidad, en el caso de gravas y enrocamientos de baja resistencia al corte se usan taludes de 1,5:1. Para el cajón se propusieron 1,4:1 para ambos taludes.

La zonificación, características, propiedades de resistencia y deformabilidad, y parámetros de colocación de los materiales se muestran en las siguientes tablas II.4 y II.5, y la figura II.5.



Tabla II.4. Zonificación de la presa El Cajón.

Material	Zona en la Estructura	Volumen (m ³)	Características
1B	Material sobre la losa de concreto	25 686	Arena fina limosa sin plasticidad
2F	Filtro bajo la junta perimetral y juntas de tensión	7 930	Grava arena limosa bien graduada
2	Soporte de losa	358 650	Grava arena limosa con contenido de finos entre 6 y 10%, 35% pasa la malla No. 4.
3A	Filtro/transición entre zona 2 y 3B	232 495	Enrocamiento bien graduado, tamaño máximo de agregado de 20 cm.
3B	Enrocamiento Principal	3 269 511	Enrocamiento bien graduado, tamaño máximo de agregado igual a 64 cm.
T	Transición	3 434 422	Enrocamiento bien graduado con tamaño máximo de agregado igual a 80 cm.
3C	Respaldo de Aguas abajo	3 418 465	Enrocamiento bien graduado con tamaño máximo de agregado igual a 83 cm.
3H	Protección de Material 1B	183 593	Rezaga libre de materiales arcillosos y de roca intemperizada, con 40 cm de tamaño máximo de agregado.
4	Enrocamiento de protección	159 955	Fragmentos de roca sana con tamaño de agregado mayor que 100 cm.

Tabla. II.5. Zonificación de materiales en El Cajón.

Zona	Material	Espesor de capa (m)	Procedimiento de compactación	Parámetros			Deflexión máxima calculada en la losa de concreto (m)
				Densidad seca (t/m ³)	Relación de vacíos e	Módulo de deformación E _c (MPa)	
3B	Enrocamiento (ignimbrita). 0,5 m de tamaño máximo.	0,8	6 pasadas RLV de 10,6 t con 20 % de agua.	2,096	0,25	70-80	0,5-0,6
T	Enrocamiento (ignimbrita). 0,6 m de tamaño máximo.	1,0	6 pasadas RLV de 10,6 t con 20 % de agua.	2,047	0,28	40-45	
3C	Enrocamiento (ignimbrita). 0,8 m de tamaño máximo.	1,4	6 pasadas RLV de 10,6 t con 20 % de agua.	-	-	20-25	

A pesar de que los espesores de capa son generosos y que el valor de los módulos de deformación de los materiales aumentan los asentamientos esperados, se generan menores costos de construcción, mayor velocidad de colocación y homogeneidad entre los materiales.

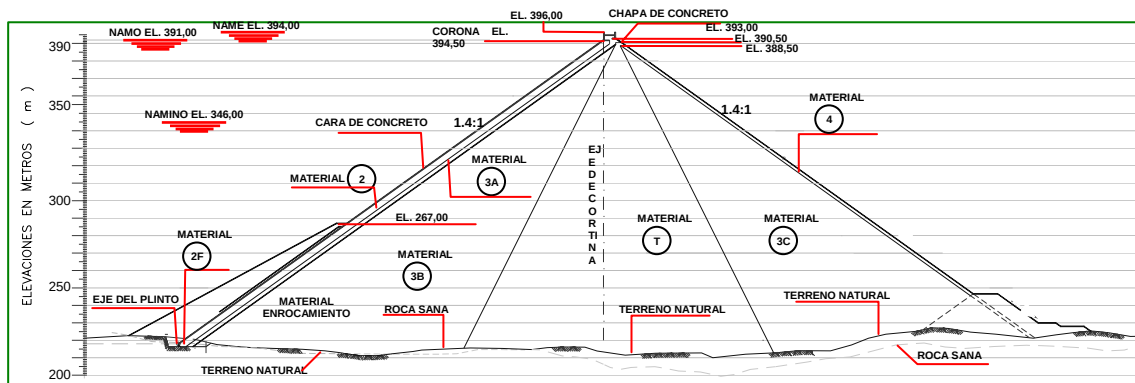


Fig. II.5. Sección máxima de la cortina.

La frontera entre los materiales 3B y T es de 0,5:1 y se hizo la evaluación del cambio del talud, así se reducirían los esfuerzos cortantes y se uniformizarían los asentamientos, teniendo menores desplazamientos horizontales, evitando la doble curvatura de la deformada de la losa de concreto y los agrietamientos asociados a este fenómeno. A pesar de que esta pendiente aumentar los desplazamientos máximos de la losa y la pérdida de bordo libre, estos valores se consideraron admisibles.

Tabla II.6. Parámetros comparados para cambio de la frontera entre materiales 3B y T en el diseño de la cortina del P. H. El Cajón.

Frontera	Desplazamiento horizontal en la losa superior (cm)	Asentamiento normal a la cara de concreto máximo (cm)	Pérdida de bordo libre (cm)
Vertical	4,1	25	27
Con talud 0,5:1	2	29	55

Como se mencionó los desplazamientos con la modificación serán mayores pero al tener una curvatura en la deformada de la losa de concreto se previenen agrietamientos como los sucedidos en Aguamilpa.

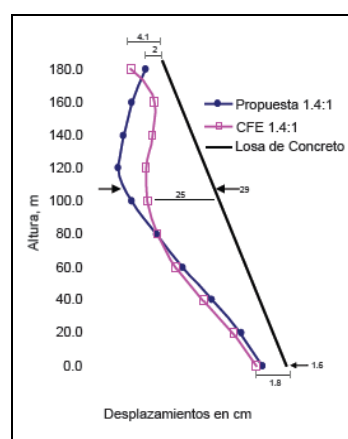


Fig. II.6. Deformadas de la losa de concreto

Adicionalmente, se incluye un material 3A que funcione como filtro y transición entre las zonas 2 y 3B.

A continuación se presentan las franjas granulométricas propuestas para cada material que conforma la cortina.

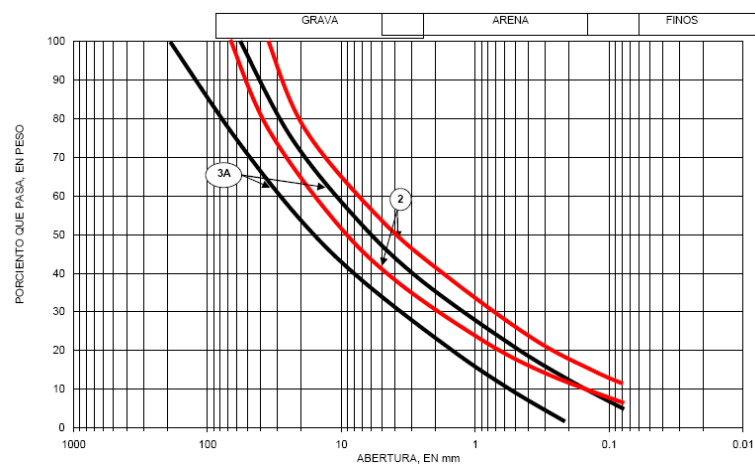


Fig. II.7. Granulometría Materiales 2 y 3A.

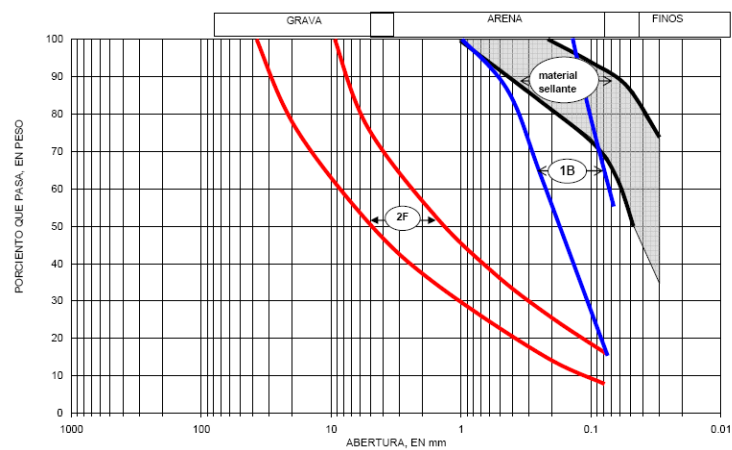


Fig. II.8. Granulometría Materiales 2F y 1B.

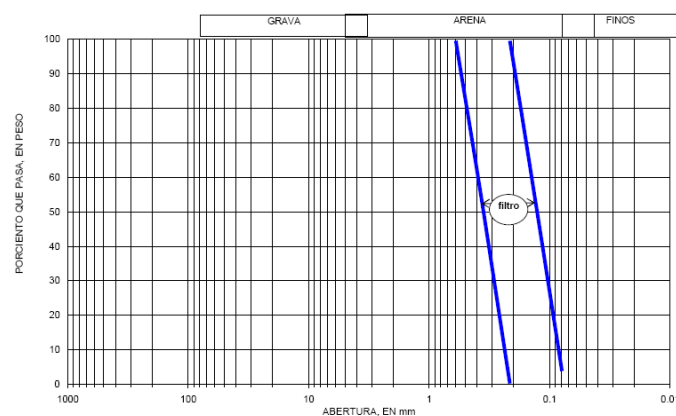


Fig. II.9. Granulometría Material filtro aguas abajo del plinto.

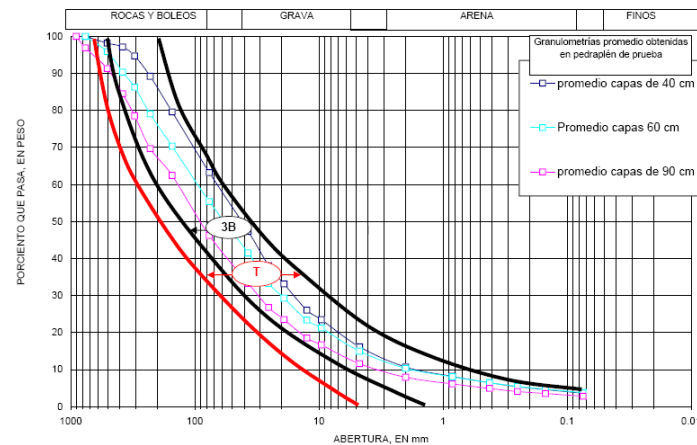


Fig. II.10. Granulometría Materiales 3B y T.

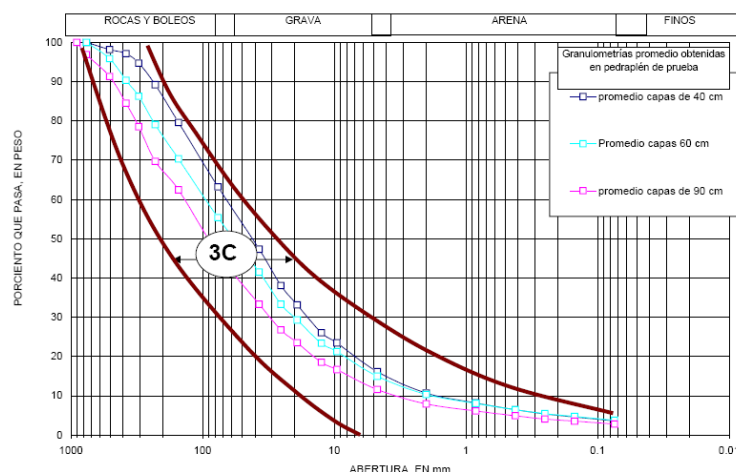


Fig. II.11. Granulometría Material 3C.

El módulo de deformación se propone en función a las deformaciones tolerables de la cortina. Para los análisis se aceptó inicialmente un desplazamiento de la cara de concreto de 60 cm (basado en experiencias de otras presas del mismo tipo, CFRD), con esta condición y empleando la ecuación propuesta por Hacelas, 1999:

$$E_{II} = 0.003 \frac{H^2}{\delta}$$

Donde:

E_{II} , Módulo de deformación del material 3B en el llenado, en MPa.

H, Altura de la presa, en m.

δ , Desplazamiento máximo en la cara de concreto, en m.

Y, considerando que el módulo de deformación durante el llenado es dos veces el de construcción, tendríamos:

$$E_C = 0.003 \frac{186^2}{2(0.6)} = 86.5 \text{ MPa}$$

Donde:

E_C , Módulo de deformación durante construcción.

Así se llegó a la conclusión de que se requería un módulo de deformación de 85 MPa para el enrocamiento principal, durante la construcción.



Los factores que se tomaron en cuenta para definir los módulos de deformación fueron:

- Dureza y forma de los granos (se mide a través del módulo de ruptura de granos, Pa).
- Compacidad (medido por la relación de vacíos).
- Granulometría (medida con el coeficiente de uniformidad, C_u , d_{60}/d_{10}).
- Tamaño máxima de partícula.
- Humedad de la roca en la compactación.
- Peso del rodillo, espesor de capa y número de pasadas en la compactación.

El módulo de deformación del material aumenta cuando crece el módulo de ruptura y el coeficiente de uniformidad y, al disminuir la relación de vacíos y el tamaño máximo de partícula.

Los factores anteriores se pueden controlar mediante las especificaciones adecuadas a excepción de la dureza la cual es una característica propia del material.

Para poder conocer las características y el comportamiento del material obtenido a partir del banco "El Vertedor", se realizaron pruebas de campo y de laboratorio. En campo se realizaron pruebas de placa con la construcción de un pedraplén de prueba con diferentes espesores de capa durante la compactación.

Con este estudio se obtuvieron valores de módulos de deformación entre 60 y 110 MPa para las capas de 40 y 60 cm. Además se obtuvieron valores de módulos de deformación para la etapa de construcción.

Tabla. II.7. Módulos de deformación durante construcción. Pedraplén de prueba.

Relación de vacíos E	Módulo de deformación durante construcción (MPa)
0,255	70
0,286	50
0,390	30

Por otra parte en el laboratorio se realizaron pruebas con el odómetro mediano y el odómetro gigante, de los cuales se muestran a continuación los resultados de dichas pruebas para condiciones secas.

Tabla. II.8. Pruebas en laboratorio para la obtención de Módulos de deformación.

Tipo de prueba	Tamaño máximo de partícula (mm)	Relación de vacíos e	Módulo de deformación (MPa)
Odómetro mediano	38	0,22	110-220
Odómetro gigante	17	0,28	110-170

A partir de los estudios se llegó a la conclusión de que el enrocamiento del banco "El Vertedor", con granulometría bien graduada, colocado en capas de 80 cm de espesor y compactado con 6 pasadas del rodillo liso vibratorio (RLV) de 10.6 t de peso alcanzará una relación de vacíos promedio de 0.26 y un modulo de deformación del orden 70-80 MPa. También se concluyó que las zonas T y 3C deberán tener valores mayores que 40 MPa y 20 MPa, respectivamente.



II.3. Análisis de la propuesta

Con la modelación de la sección propuesta se llegó a las siguientes observaciones:

- Se tuvieron desplazamiento máximo de la losa de concreto de entre 50 y 60 cm, con capas de 0,8 m de espesor en el material 3B.
- Presentó desplazamientos horizontales y verticales en la zona superior mayores a las demás, debido a que el material 3C tuvo un valor bajo en el módulo de deformación, sin embargo, esto no significa una diferencia importante en el comportamiento de la presa.
- La deformada de la losa de concreto no presentó más de una curvatura, esto es debido a que se procuró que la relación entre los módulos de deformación entre materiales adyacentes fuera menor que dos; lo anterior es para prever posibles agrietamientos en la losa de concreto similares a los que sucedieron en Aguamilpa.

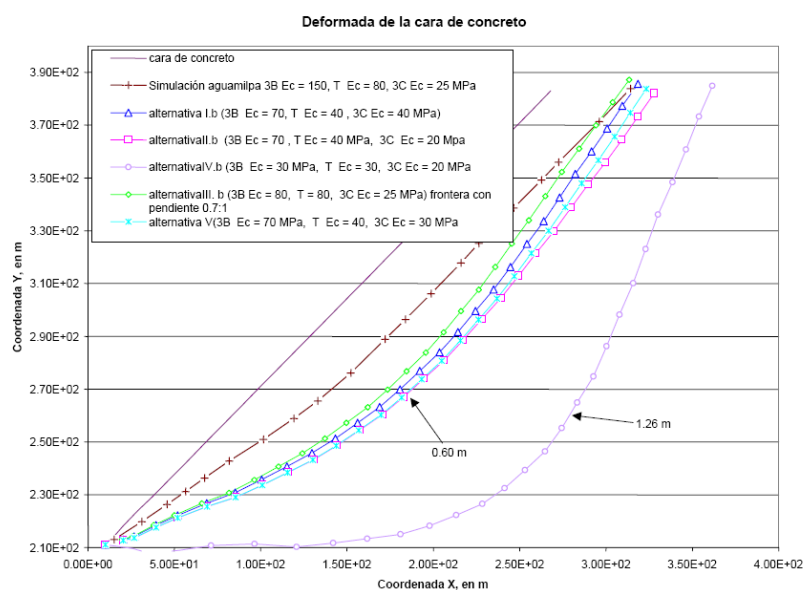


Fig. II.12. Deformada de la cara de concreto para cada alternativa.

- Se consideró agregar agua durante la compactación con lo que reduce los desplazamientos a largo plazo. A partir de los análisis se determinó que:
 - Más del 70 % de la deformación a largo plazo ocurrirá dentro del primer año.
 - Del segundo al décimo año la deformación axial a largo plazo será del orden de 0,1 % en las zonas de mayor esfuerzo, posteriormente las deformaciones serán despreciables.
- Con las pruebas realizadas a los materiales provenientes del banco “El Vertedor” se llegó a la conclusión que el terraplén puede clasificarse como bien graduado y de grano blando. Su resistencia al corte fue de $\phi = 58,5^\circ$ y $\Delta\phi = 12^\circ$, se comprobó que mejora sus características con la profundidad conservando su clasificación.



II.4. Instrumentación instalada.

Con la instrumentación geotécnica es posible conocer información cuantitativa para poder adecuar y corregir obras civiles, su fin es conocer el comportamiento de las estructuras desde la etapa de construcción y durante su vida útil para detectar oportunamente cualquier anomalía que se pueda presentar.

El sistema de auscultación propuesto para el P. H. El Cajón es parcialmente automatizado. La instrumentación automatizada permite reducir significativamente los tiempos de lectura y proceso de datos. La instrumentación no automatizada obliga a realizar recorridos para complementar la información con mediciones manuales.

Los parámetros a medir elegidos fueron:

- a) Niveles hidráulicos de agua en el cuerpo de la cortina.
- b) Desplazamientos del cuerpo de la cortina, tanto internos como superficiales.
- c) Movimientos de las juntas verticales y perimetral de la cara de concreto.
- d) Registro de la precipitación pluvial en la zona de la cortina.
- e) Aforo de filtraciones.
- f) Registro de eventos sísmicos.
- g) Esfuerzos y deformaciones en el interior del cuerpo de la presa.

En el cuerpo de la cortina se instrumentaron: tres secciones paralelas al eje del río correspondientes a los ejes de las losas L-16, L-21 y L-26 de la cara de concreto; en el eje de la presa y a nivel superficial sobre las losas.

En cada sección transversal se instrumentó en cuatro elevaciones: cimentación, elevación 245, elevación 290 y elevación 330. Se eligieron cinco tipos de aparatos de medición y un sistema de control superficial conocido como líneas de colimación, además de contar con aparatos para determinar los niveles y el flujo del agua en galerías y las aceleraciones sísmicas de la estructura:

- Inclínómetros.
- Celdas de presión (Tipo CFE).
- Piezómetros eléctricos (Tipo CFE) y abiertos (Tipo Casagrande)..
- Extensómetros (Tipo CFE).
- Niveles hidráulicos de asentamientos (Tipo CFE).
- Medidores de filtraciones en galerías.
- Acelerógrafos.

El proyecto de instrumentación se dividió básicamente en dos partes, la primera fue la instrumentación en el cuerpo de la cortina y la segunda, la instrumentación en la cara de concreto.

II.4.1. Cuerpo de la cortina.

La instrumentación de la cortina comprendió tres ejes de instalación y estudio, separados uno del otro 75 metros, los cuales coinciden con las losas 16, 21 y 23 respectivamente, a su vez cada eje tiene cuatro plataformas con diferentes instrumentos a las elevaciones: cimentación, elevación 245, 290 y 330. (Figs. II.13, II.14, II.15 Y II.16, Tabla II.9).

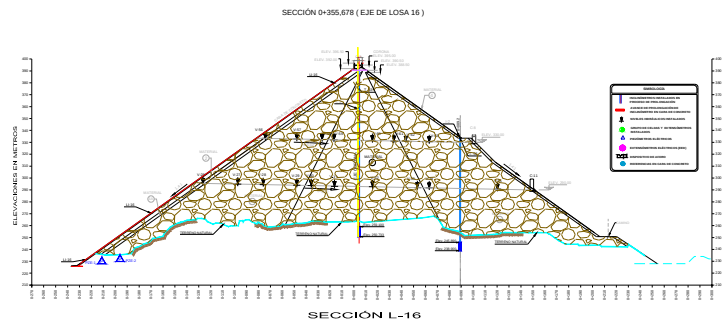


Fig. II.13. Instrumentación en la sección L-16.

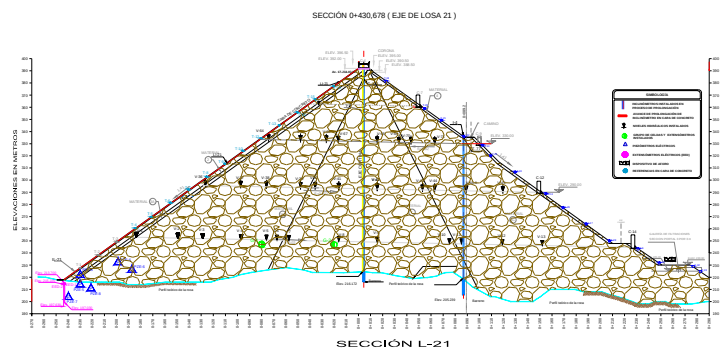


Fig. II.14. Instrumentación en la sección L-21.

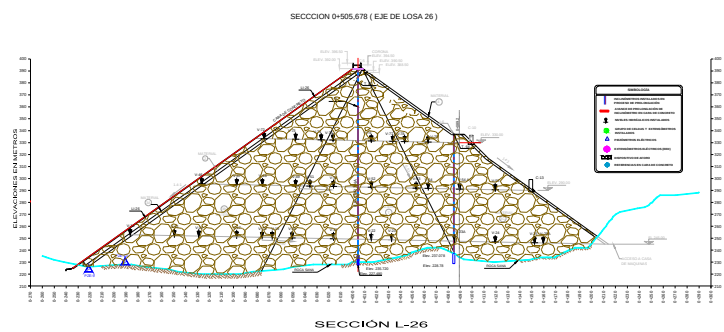


Fig. II.15. Instrumentación en la sección L-26.



Tabla II.9. Instrumentación del cuerpo de la cortina de la P. H. El Cajón.

Aparatos	Ubicación					Total Piezas
Líneas de niveles hidráulicos	Elevación					
	245	290		330		
L-16	-	V-26 al V-35		V-56 al V-63		18
L-21	V-1 al V-13	V-36 al V-45		V-64 al V-71		31
L-26	V-14 al V-25	V-46 al V-55		V-72 al V-79		30
Elev. 361.	VL-7 al VL-14, VL-16, VL-21, y VL-26 al VL-32					17
Celdas eléctricas de asentamiento	Plataforma 361, CEA-9, CEA-11, CEA-13, CEA-16, CEA-21, CEA-26, CEA-28, CEA-30 y CEA-32					9
Inclinómetros	Corona		Respaldo			6
	I-1 losa L-16		I-2 losa L-16			
	I-3 losa L-21		I-4 losa L-21			
	I-5 losa L-26		I-6 losa L-26			
Piezómetros eléctricos	L-16	L-18	L-21	L-23	L-26	10
	PZE-1 y 2	PZE-3, y 4	PZE-5 y 6	PZE-7, y 8	PZE-9, y 10	
Grupos de celdas y extensómetros	Grupos 1 y 2 en la sección L-21 a la elevación 245					24
Referencias topográficas	34 en líneas transversales					34
	247 en líneas longitudinales					247
	17 bancos de nivel					17
	16 bases de centraje					16
Acelerógrafos	Uno en corona, uno en cada margen, uno al pie de la cortina y uno en la ladera izquierda					5

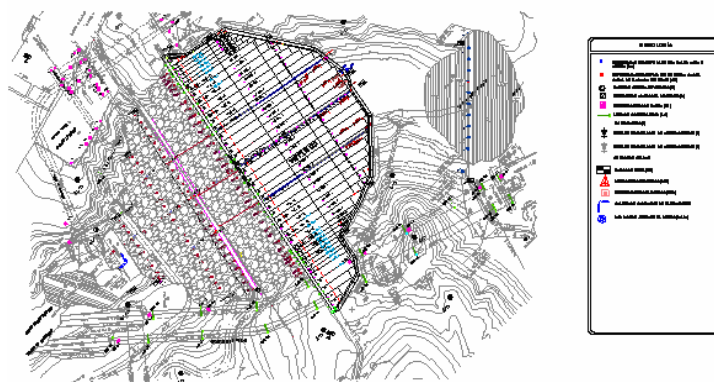


Fig. II.16. Distribución de la instrumentación en planta.



II.4.2. Cara de concreto.

El conocimiento del comportamiento de la cara de concreto es de vital importancia al ser el elemento impermeable de las presas de tipo CFRD. A continuación se muestran los datos y la ubicación de los instrumentos instalados en la cara de concreto (Tabla II.10, Fig. II.17).

Tabla II.10. Instrumentación en la cara de concreto.

Extensómetros	Sección	Tipo de junta	Total Piezas
EXT	L-8, L-10, L-12, L-16, L-21, L-26, L-30, L-35A, L-35B.	Losa-plinto	9
EXB	L-3, L-7, L-12, L-16, L-21, L-26, L-31, L-35	Losa-parapeto	8
EXU	Entre las secciones L-2 a L-11 y L-27 a L-34 a la elev. 360, y entre las secciones L-20 a L-23 a las elev. 330 y 360.	Verticales losa-losa	24
Medidores de juntas mecánicas	Entre las secciones L-16 a L-28, a la elev. 392.	Verticales losa-losa	12
Inclinómetros	IL-16, IL-21, IL-26		3

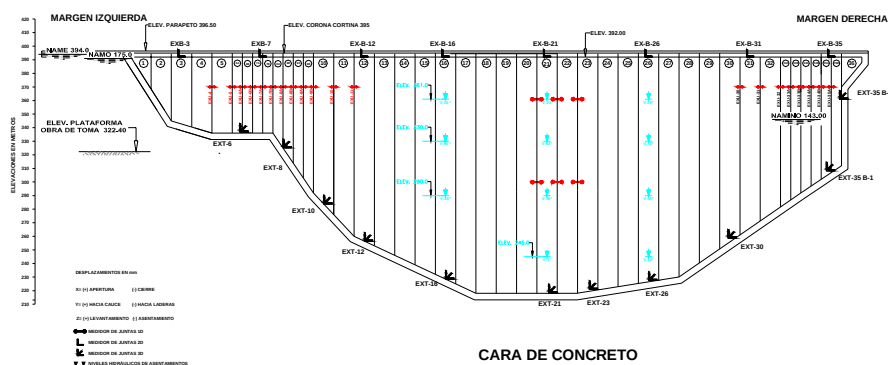


Fig. II.17. Instrumentación en la cara de concreto.



III. CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA EL CAJON

III.1. Programa de construcción.

III.1.1. Programa contractual.

III.1.1.1. Construcción del plinto.

La construcción del plinto se programó en tres etapas la primera que abarcó margen izquierda y centro del cauce hasta la elevación 230 y debía completarse antes de diciembre de 2004. En la segunda se incluyó el segmento de la elevación 230 a la 282 en la margen derecha para completarse antes de enero de 2005. Y la tercera que corresponde al resto de la margen derecha, hasta la cota 392 que se construiría entre febrero y abril de 2005.

Cada etapa de construcción incluía la limpieza del terreno, tratamiento de la roca y construcción del plinto.

CONCEPTO	CANTIDAD	INICIA	TERMINA	2004												2005												2006														
				J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D									
PLINTO																																										
PLINTO 2A. ETAPA DE ELEV. 230 A 282	600.00	m³	09-Dic-04																																							
PLINTO 3A. ETAPA DE ELEV. 282 A 392	1,169.00	m³	01-Feb-05																																							
COLOCACION DE MATERIALES																																										
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 1A, ELEV 282	2,793,993.00	m³	02-Ago-04																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 1B, ELEV 282	1,142,244.00	m³	17-Nov-04																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 2, ELEV. 300	1,218,839.00	m³	18-Mar-05																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 3, ELEV. 342	2,162,036.00	m³	17-May-05																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 4, ELEV. 342	1,327,687.00	m³	16-Sep-05																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 5, ELEV. 390	1,712,904.00	m³	16-Dic-05																																							
COLOCACION DE MATERIALES ETAPA 6, ELEV. 394.50	20,390.00	m³	01-Jul-06																																							
CONCRETO																																										
LOSAS DE ARRANQUE PRIMERA ETAPA	1,600.00	m³	10-Ene-05																																							
CARA DE CONCRETO DESLIZADO PRIMERA ETAPA ELEV. 280	19,571.00	m³	01-Mar-05																																							
LOSAS DE ARRANQUE SEGUNDA ETAPA	800.00	m³	20-Jun-05																																							
CARA DE CONCRETO DESLIZADO SEGUNDA ETAPA ELEV. 340	21,034.00	m³	01-Sep-05																																							
LOSAS DE ARRANQUE TERCERA ETAPA	500.00	m³	01-Feb-06																																							
CARA DE CONCRETO DESLIZADO TERCERA ETAPA ELEV. 388	13,338.00	m³	31-Mar-06																																							
CARA DE CONCRETO LOSA DE CIERRE ELV. 391.79	644.00	m³	02-Ago-06																																							
PARAPETO	5,566.00	m³	15-Sep-06																																							

Tabla. III.1. Programa de obra de la cortina.

III.1.1.2. Construcción del terraplén.

La colocación de los materiales del terraplén se programó para realizarse en seis etapas (Fig. III.1).

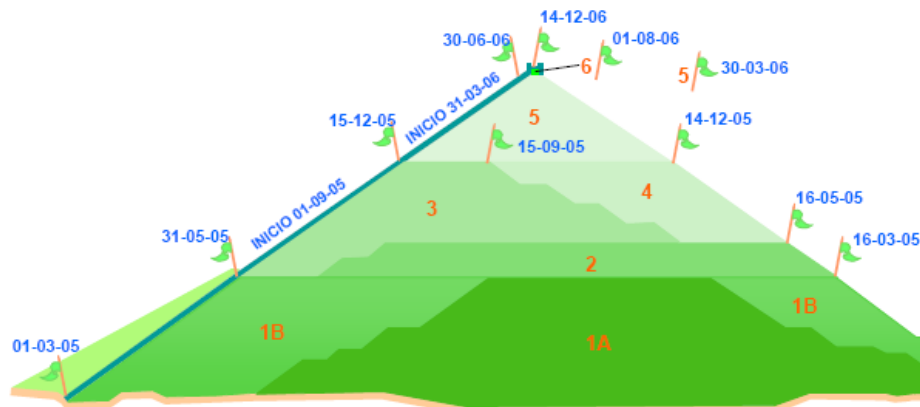


Fig. III. 1. Etapas de construcción del terraplén.



Los volúmenes totales de materiales para cada etapa de construcción tanto parciales como acumulados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III.2. Volúmenes de materiales durante la construcción del terraplén.

Etapa	1A	1B	2	3	4	5	6
Volumen parcial(10^6 m^3)	2.794	1.142	1.219	2.162	1.327	1.712	.002
Volumen acumulado(10^6 m^3)	2 794	3.936	5.155	7.317	8.645	10.357	10.378

III.1.1.3. Construcción de la cara de concreto.

Para losas de concreto el programa de construcción se dividió en cinco etapas:

1. Colado de 19 losas de arranque y las 19 losas de la cara hasta alcanzar la elevación 280 en mayo de 2005.
2. Colado de 9 losas de arranque para octubre de 2005 y 27 losas de la cara de concreto para diciembre de 2005, llegando a la cota 340.
3. Colado de 8 losas de arranque para abril de 2005 y 34 de la cara de concreto para junio de 2006, alcanzando la elevación 388.
4. Colado de las 26 losas de cierre de la cara de concreto para octubre de 2006.
5. Colado del parapeto alcanzando la elevación 395,5 en diciembre de 2006.

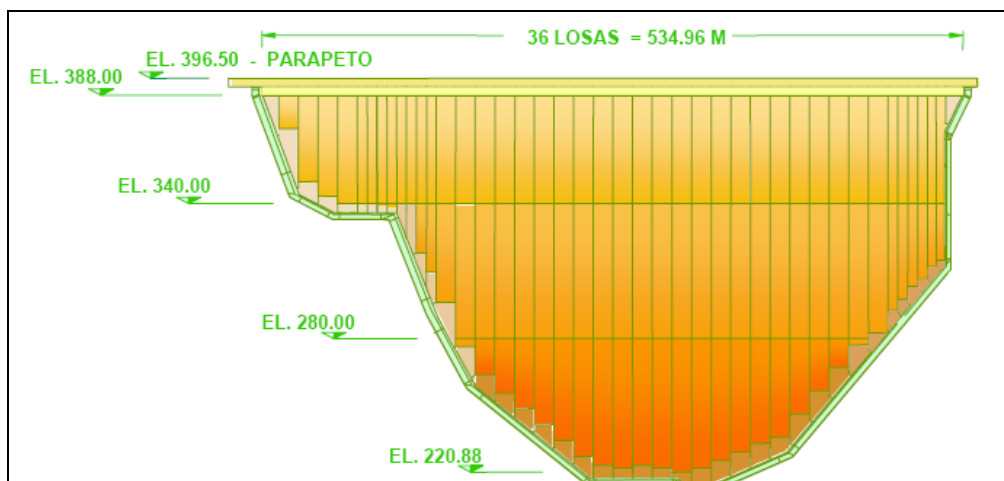


Fig. III. 2. Etapas de colado de la cara de concreto.

III.1.2. Procesos constructivos.

III.1.2.1. Construcción del terraplén.

El primer paso para la construcción del terraplén fue la limpieza del cauce del río y las laderas con la finalidad de desplantar la presa sobre roca sana.

Los materiales colocados en la cortina de la presa El Cajón fueron extraídos del banco de materiales "El Vertedor", ubicado en la margen izquierda hacia aguas abajo. Las características que se consideraron para la colocación de cada material fueron las siguientes.



Tabla III.3. Características de los materiales colocados en el terraplén.

MATERIAL	CARACTERISITICAS
1B	Material colocado sobre la losa de concreto en capas de 30 cm de espesor y nivelado con tractor
3H	Colocado sobre el material 1B con tractor en capas de 40 cm.
2F	Colocado al pie de la losa de concreto con rodillo liso vibratorio (RLV) de 104 kN en capas de 230 cm, con inclusión de agua, compactado hasta alcanzar la relación de vacíos de 0,22 o menor.
2	Respaldo de la cara de concreto, se colocó en capas de 30 cm con RLV de 104 kN con inclusión de agua hasta alcanzar un peso específico seco igual o mayor 21 kN/m^3 .
3A	Transición entre los materiales 2 y 3B compactado con RLV de 104 kN en capas de 30 cm con la aplicación de agua hasta alcanzar una relación de vacíos de 0,24.
3B	Enrocamiento principal, compactado con RLV de 10 T en capas de 80 cm con la aplicación de agua a razón de 200 L/s por cada metro cúbico de material.
T	Enrocamiento de transición. Compactado con RLV de 10 T en capas de 1,00 m con la aplicación de agua a 200 L/s por cada metro cúbico de material.
3C	Respaldo aguas abajo, compactado con RLV de 10 T en capas de 1,40 m con la aplicación de agua a 200 L/s por cada metro cúbico de material.
4	Enrocamiento de protección colocado a volteo sobre el material 3C.

III.1.2.2. Construcción de la cara de concreto.

Las losas de la cara de concreto se colaron en tres etapas con losas de 15 m de longitud al centro y 7,5 hacia las márgenes, tiene un área aproximada de $110\,000 \text{ m}^2$ y se utilizó en sus construcción cerca de $63\,000 \text{ m}^3$ de concreto, el espesor de la losa es de 78 cm en la parte superior y 30 cm en la junta con el parapeto.

Las losas se colaron a partir del plinto con losas de arranque, posteriormente se construyeron con cimbra deslizante de madera forrada en lámina galvanizada que soporta los equipos de izaje, bomba hidráulica, mangueras de alta presión y gatos hidráulicos.

Después de la colocación del armado de las losas se procedió al colado mediante el empleo de la cimbra deslizante con un rendimiento de 3 m/hora.

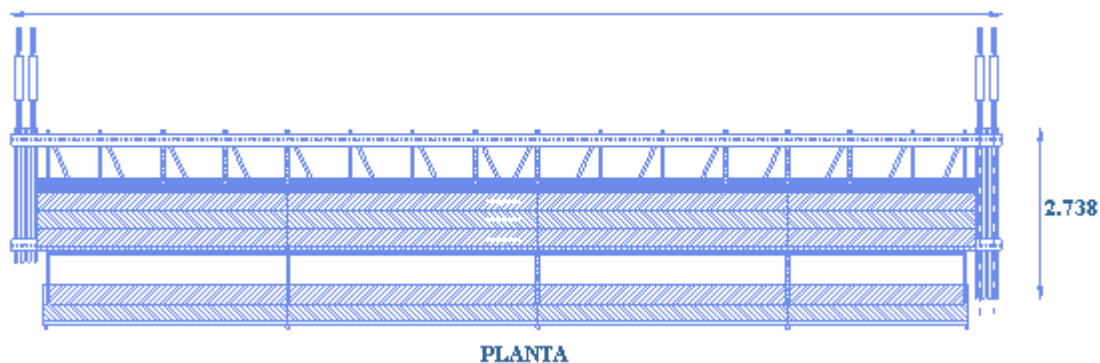




Fig. III. 3. Cimbra deslizante para el colado de las losas de concreto.

III.1.2.3. Construcción del plinto.

El plinto construido en El Cajón es una estructura de concreto armado anclada a la roca y con una longitud total de 1 750 m.

Para iniciar la colocación del plinto es necesario efectuar la limpieza del cauce y las laderas. La excavación inició a partir de la cota 392 en margen izquierda avanzando hacia el cauce hasta llegar a la elevación 210. Posteriormente, se siguió en margen derecha de la elevación 218 a la 296, dejando pendiente la excavación de cauce hasta el cierre final. Finalmente se excavó la margen derecha entre las cotas 296 y 392.

Para la excavación se consideraron las siguientes etapas:

- Perforación de precorte en la línea del talud.
- Perforación de producción (banqueo de 6 m).
- Voladura.
- Remoción de material.
- Saneamiento del talud.
- Tratamientos en taludes.

Los tratamientos de la roca consistieron en anclajes, inyecciones de consolidación e inyecciones de la pantalla impermeable.

Los anclajes consistieron en varillas de 1,5 pulgadas de diámetro a 3,0 m de profundidad, posteriormente a los anclajes se colocó el armado del plinto, para finalmente realizar el colado con la ayuda de una cimbra deslizante en las laderas y con tableros en el cauce.

Previo al colado se fijaron tubos guía para realizar los barrenos de inyecciones, los cuales consisten en tres líneas: dos externas que corresponden a los barrenos de consolidación y la línea central que corresponde a la pantalla de impermeabilización, que tuvieron una profundidad de 70 m y 2,25 pulgadas de diámetro.

III.2. Comportamiento durante construcción.

La construcción del terraplén inició en 2003 y para dar seguimiento ésta etapa se utilizaron diversos aparatos. A continuación se describen los resultados obtenidos a partir de las mediciones de cada instrumento.



III.2.1. Deformaciones en el terraplén.

Los aparatos que se utilizaron para medir las deformaciones en el terraplén fueron: niveles hidráulicos de asentamiento, inclinómetros y referencias topográficas.

III.2.1.1. Asentamientos.

Los niveles hidráulicos se colocaron en tres plataformas a las elevaciones 245, 290 y 330; en tres secciones: L-16, L-21 y L-26. Además de los que fueron colocados detrás de la cara de concreto a la elevación 361.

Durante la etapa de construcción, los mayores asentamientos se registraron al centro del material T (Tabla III.4), en el instrumento V-42 ubicado en la sección L-21 a la elevación 290. El asentamiento medido al inicio del primer llenado fue de 84,8 cm. En la figura III se nota que el asentamiento cuando se nota un cambio en la tendencia es de 87,3 cm cuando el terraplén comenzó a sufrir los efectos de la carga hidráulica debida al embalse.

Tabla III.4. Comparación entre asentamientos de cada material.

Sección	Elevación (m.s.n.m.)	Material	Aparato	Fecha de instalación	Asentamiento después de construcción (cm)
L-16	290	3B	V-28	17-Jun-05	27,5
		T	V-32	18-May-06	50,5
		3C	V-35	28-Feb-05	41,6
	330	3B	V-57	20-Dic-05	31,2
		T	V-60	26-Nov-05	62,7
		3C	V-63	29-Nov-05	51,1
L-21	245	3B	V-3	28-Ene-05	24,4
		T	V-9	20-Sep-04	43,3
		3C	V-12	15-Sep-04	41,8
	290	3B	V-37	9-Jul-05	36,2
		T	V-42	16-May-05	87,3
		3C	V-44A	8-Abr-05	73,6
	330	3B	V-65	26-Nov-05	47,7
		T	V-68	1-Dic-05	74,5
		3C	V-71	3-Dic-05	60,4
L-26	245	3B	V-16	27-Ene-05	22,1
		T	V-21	8-Sep-04	32,0
		3C	V-25	24-Ago-04	11,1
	290	3B	V-48	14-Jun-05	46,1
		T	V-52	14-May-05	79,0
		3C	V-54A	7-Abr-05	57,7
	330	3B	V-73	25-Nov-05	41,5
		T	V-76	30-Nov-05	69,8
		3C	V-79	1-Dic-05	56,3

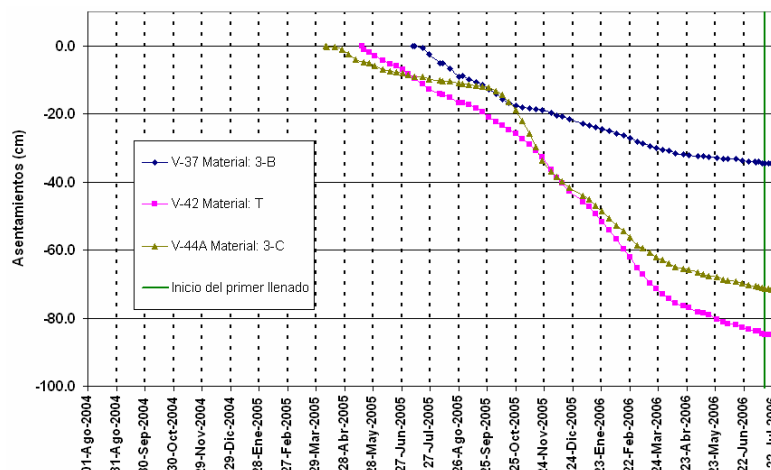


Fig. III. 4. Comparación entre materiales. Sección L-21. Elev. 290.

Concentrando todos los asentamientos en las siguientes figuras III.3, se puede apreciar que los mayores asentamientos se presentan en la sección L-21 en el material T.

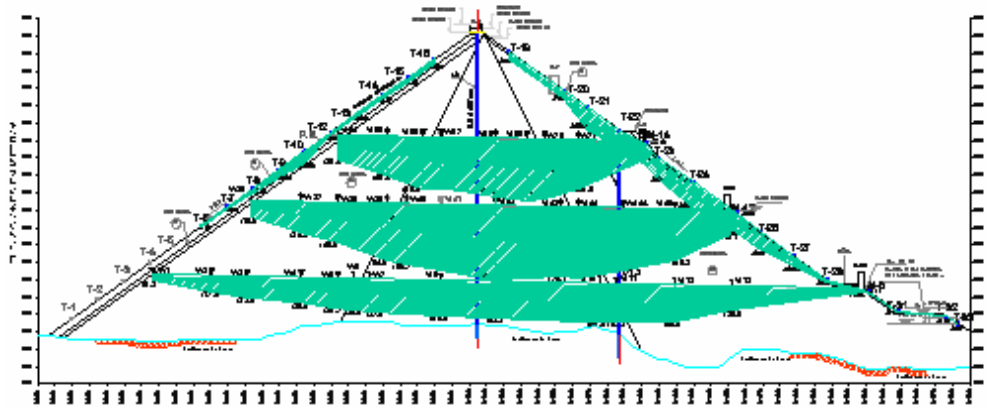


Fig. III. 5. Asentamientos en el terraplén medidos con NHA. Sección L-21.

En los niveles hidráulicos de asentamiento instalados atrás de la cara de concreto se registró un asentamiento de 22,9 cm al 10 de julio de 2006. Hacia las márgenes los asentamientos son simétricos con un valor de 15 cm. En la siguiente figura se muestra la evolución del asentamiento atrás de la cara de concreto a la elevación 361, durante la etapa de construcción.

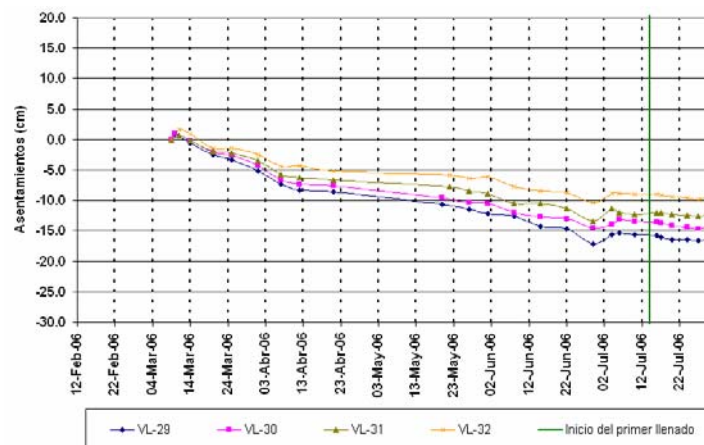


Fig. III.6. Asentamientos en losas concreto. Elev. 361. Losas centrales.



El asentamiento máximo al final de la etapa de construcción fue de 80,6 cm en el inclinómetro I-1 al 13 de junio de 2006, y se presentó a la elevación 310 que corresponde al 56% de la altura total del terraplén en esa zona.

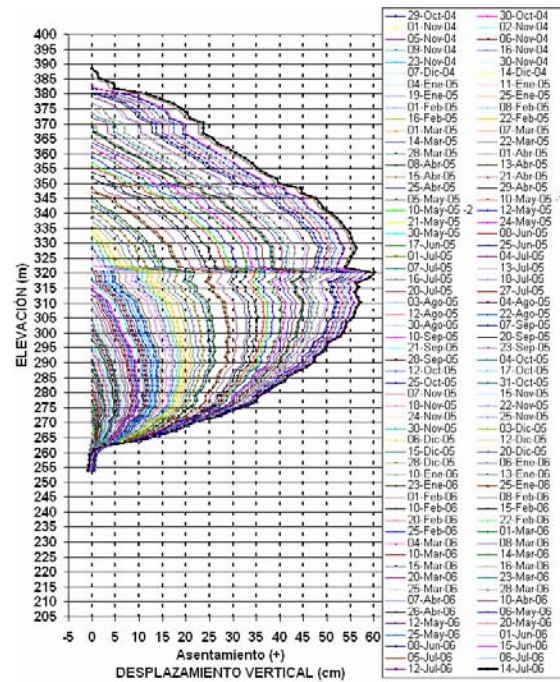


Fig. III.7. Asentamientos en Inclinómetro I-1.

Las referencias topográficas durante la construcción fueron dispuestas en tres líneas horizontales a las elevaciones 245, 290 y 330, y una transversal al eje de la cortina sobre la sección L-21. En el caso de las líneas horizontales, los máximos asentamientos se localizaron en la zona central de la cortina. Para la línea ubicada a la elevación 245 el mayor asentamiento de 1,7 cm al 10 de julio de 2006 se midió en la referencia M-6, que se encuentra sobre el eje de la sección L-21.

En la línea instalada a la elevación 290 el valor máximo de asentamiento fue de 23,1 cm al 11 de julio de 2006 en el aparato M-13, que se ubica en la sección L-22.

El mayor asentamiento en el enrocamiento fue de 25,9 cm a la elev. 330 en el aparato M-15 al 12 de julio de 2006 localizado en la sección L-22.

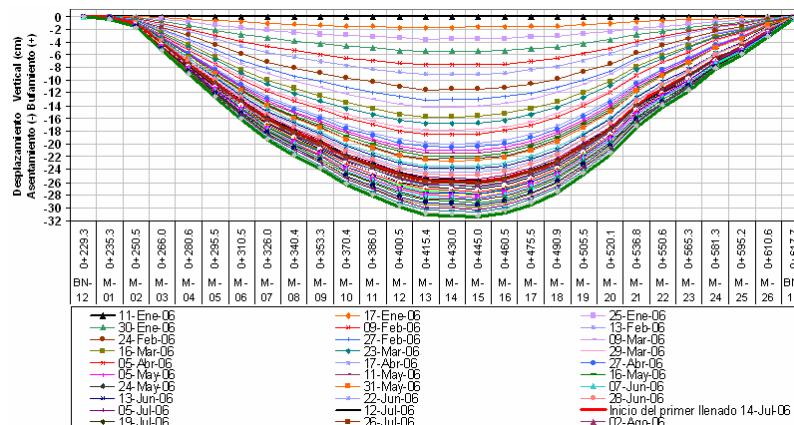


Fig. III.8. Asentamientos en Referencias topográficas. Elev. 330.



En la línea transversal sobre la sección L-21 el máximo asentamiento ocurre en la parte más alta, debido a que es más grande el espesor de material deformable. El valor máximo fue de 65,8 cm al día 11 de julio de 2006, en la referencia T-19 localizada a la elevación 380.

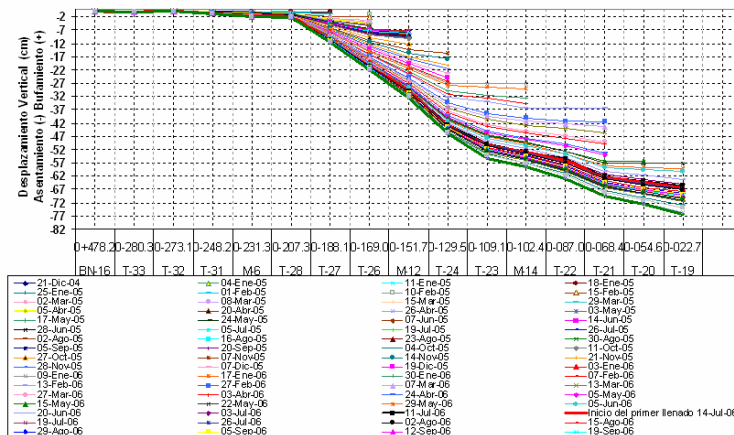


Fig. III. 9. Asentamientos en Referencias topográficas. Sección L-21.

III.2.1.2. Desplazamientos horizontales.

Los desplazamientos horizontales durante la época de construcción se midieron en el terraplén con inclinómetros y referencias topográficas. Con estos aparatos es posible medir los desplazamientos en dos direcciones horizontales: una en dirección del río y otra en dirección del eje de la cortina.

Los mayores desplazamientos se midieron en los inclinómetros colocados en el material 3C, estos aparatos también son los que tienen su boquilla a menor elevación en cada sección.

En la dirección eje del río todos los inclinómetros mostraron desplazamientos hacia aguas abajo. Los aparatos tuvieron sus desplazamientos máximos aproximadamente a la mitad de la altura total del terraplén. El máximo desplazamiento fue de 22,6 cm a la elevación 282 en el inclinómetro I-4.

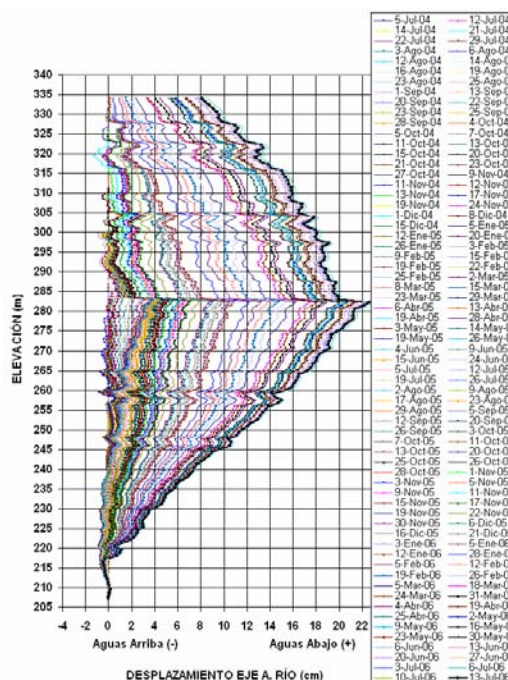


Fig. III.10. Desplazamientos eje del río. Inclinómetro I-4.



Los movimientos horizontales en dirección del eje de la cortina registrados en inclinómetros durante la etapa de construcción fueron hacia el centro del terraplén, en la sección máxima el desplazamiento se inclinó mas hacia la margen derecha pero en un valor pequeño comparándolo con los movimientos registrados por los demás aparatos.

Los inclinómetros I-1 e I-2 ubicados en la sección L-16 (hacia margen izquierda) tuvieron desplazamientos horizontales hacia margen derecha con valor máximo de 12 cm en el inclinómetro I-2 al día 13 de julio de 2006, a la elevación 329, lo que significa el 96 % de la altura del terraplén.

El inclinómetro I-4 que se localiza en la sección L-21 (sección máxima) tuvo desplazamientos máximos del orden de 4,5 cm hacia margen derecha en la zona superior del tubo, en la parte inferior tuvo un desplazamiento máximo de 2,0 cm hacia margen izquierda, el movimiento del inclinómetro I-3 fue hacia margen derecha con valor máximo de 5,8 cm en la zona inferior del aparato, cabe aclarar que la última lectura registrada de este aparato en esta tesis fue al 13 de junio de 2006.

Los inclinómetros I-5 e I-6 se encuentran en la sección L-26 (hacia margen derecha) tuvieron desplazamientos hacia margen izquierda con valor máximo de 9,4 cm en el inclinómetro I-5 al 15 de julio de 2006, a la elevación 321, es decir, cercano al 60 % de la altura total del terraplén.

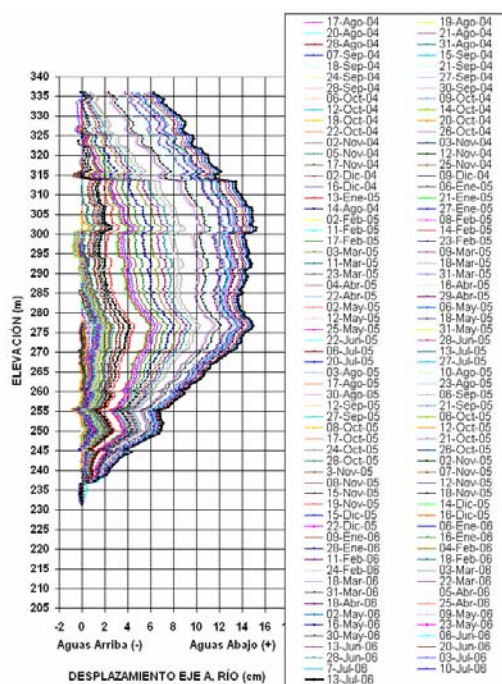


Fig. III. 11. Desplazamientos eje de la cortina. Inclinómetro I-6.

Los desplazamientos horizontales en referencias topográficas, instaladas en el enrocamiento, se midieron en dos direcciones: en el eje del río y en el eje de la cortina; a las elevaciones 145, 290 y 330, y en una línea transversal sobre la sección L-21. Las últimas lecturas reportadas en la etapa de construcción corresponden a mediados de junio de 2006, aproximadamente un mes antes del inicio del primer llenado.

En la dirección eje del río los desplazamientos a la elevación 245 fueron hacia aguas abajo, el máximo desplazamiento fue de 2,5 cm en la zona central del terraplén. En la elevación 290 el mayor desplazamiento se midió en la referencia M-20 con 5,9 cm. Los desplazamientos medidos a la elevación 330 se presentaron hacia la margen derecha con valor de 6,5 cm en la referencia M-22.

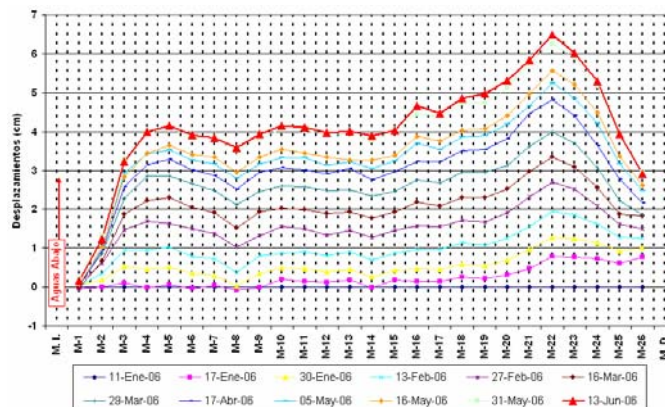


Fig. III.12. Desplazamientos eje del río. Referencias topográficas. Elev. 330.

En la línea transversal de la sección L-21, todos los desplazamientos medidos ocurrieron hacia aguas abajo, los mayores desplazamientos se dieron en la altura central del terraplén con 12,4 cm en la referencia T-26, ubicada debajo de la línea 290.

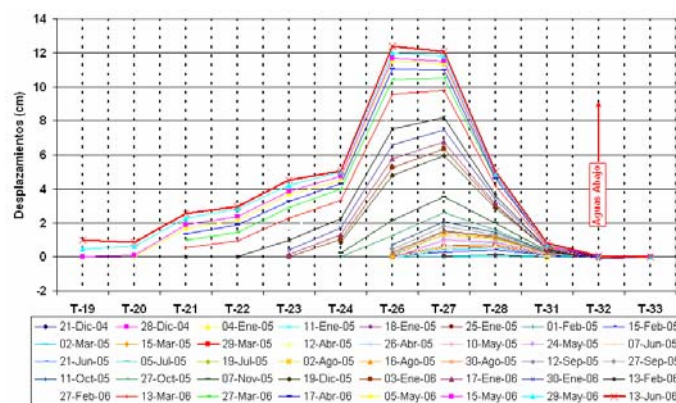


Fig. III.13. Desplazamientos eje del río. Referencias topográficas. Sección L-21.

En la elevación 245, los desplazamientos sobre el eje de la cortina fueron hacia la margen izquierda, con valores máximos de 0,4 cm en la zona central al 12 de junio de 2006. En la elevación 290 indicaron un movimiento dirigido hacia la margen derecha, en margen izquierda el máximo valor fue 2,75 cm, mientras en margen derecha el máximo desplazamiento hacia margen izquierda fue de 2,0 cm.

En la elevación 330 los desplazamientos tuvieron la tendencia de movimiento hacia la zona central del terraplén, en las dos márgenes se registraron valores máximos de 3,9 cm ambos hacia el centro del cauce.

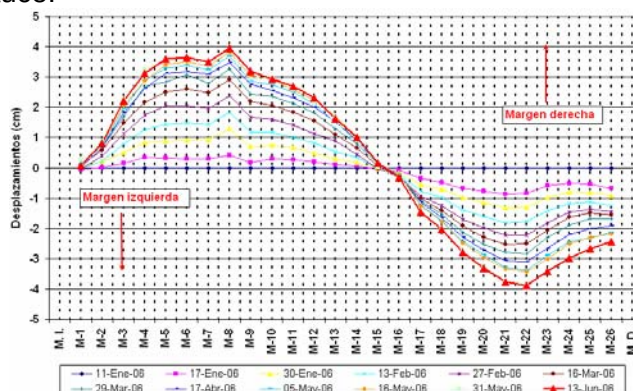


Fig. III.14. Desplazamientos eje de la cortina. Referencias topográficas. Elev. 330.



Sobre la sección máxima se distingue que los desplazamientos en la parte inferior del terraplén fueron hacia la margen izquierda, mientras en la zona superior fueron hacia margen derecha en donde se presentó el mayor valor de 1,7 cm.

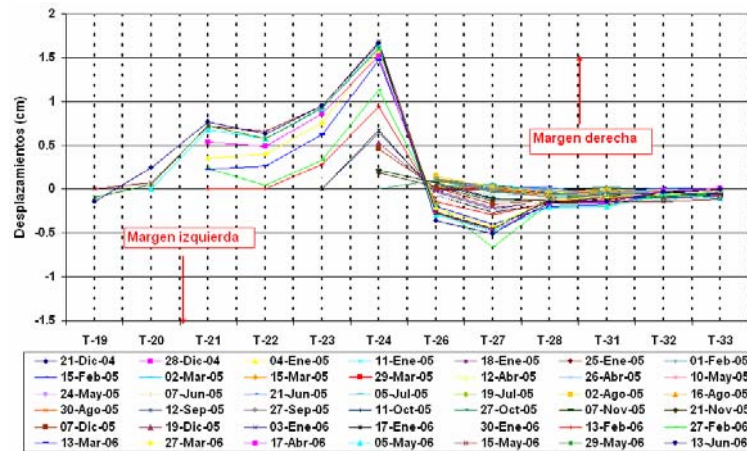


Fig. III.15. Desplazamientos eje de la cortina. Referencias topográficas. Sección L-21.

III.2.2. Módulos de deformación.

Durante el periodo de construcción fue posible calcular los módulos de deformación con las mediciones de tres aparatos: Niveles Hidráulicos de Asentamientos (NHA), inclinómetros y grupos de celdas de presión y extensómetros.

Los resultados obtenidos con estos cálculos fueron:

Todos los materiales marcan en un inicio módulos de deformación altos debido a los pequeños asentamientos medidos después de la instalación de los aparatos, posteriormente llegan a un estado estable cuyas variaciones están en función al crecimiento del terraplén.

En la elevación 245 los módulos de deformación del material 3B que se calcularon variaron entre 45 y 115 MPa, los mayores valores se asocian con los aparatos más cercanos a la cara de concreto.

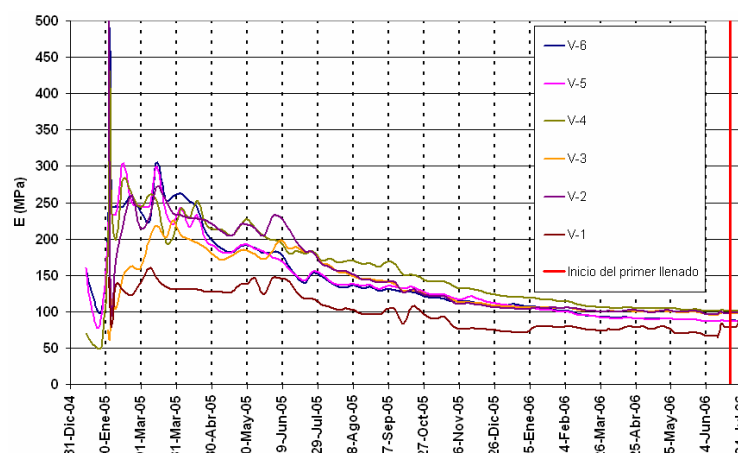


Fig. III.16. Módulos de deformación (Penman). Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.

En la elevación 290 los módulos de deformación tuvieron un amplio rango de valores en el material 3B el cual fue entre 15 y 110 MPa al final de la construcción, se debe aclarar que la mayoría tuvo módulos superiores a los 75 MPa y las cifras inferiores corresponden a los aparatos más cercanos a la cara de concreto, donde el esfuerzo debido al material es menor. El comportamiento anterior se repite en la elevación 330 donde se obtienen valores



de módulos de deformación entre 15 y 100 MPa, los valores mínimos son asociados a los NHA más cercanos a la losa de concreto.

En el material T a la elevación 245, los módulos de deformación calculados variaron entre 80 y 135 MPa. En la elevación 290 los módulos variaron entre 52 y 117 MPa. Y a la elevación 330 tuvieron valores entre 74 y 135 MPa.

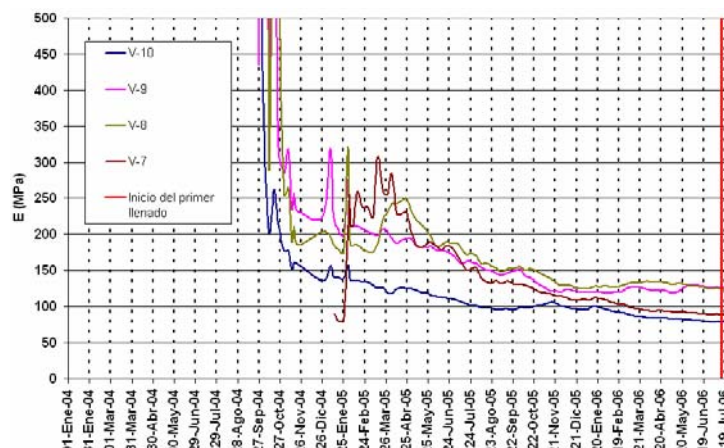


Fig. III.17. Módulos de deformación (Penman). Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.

En general, los módulos calculados en el material 3C son los de menor magnitud debido a que éste tiene mayor deformabilidad respecto a los otros materiales; a la elevación 245 los cálculos resultaron entre 55 y 100 MPa. En la elevación 290 los módulos disminuyen con respecto a la 245, teniendo valores entre 25 y 75 MPa. En la elevación 330 mantuvieron al final de la construcción valores entre 40 y 80 MPa.

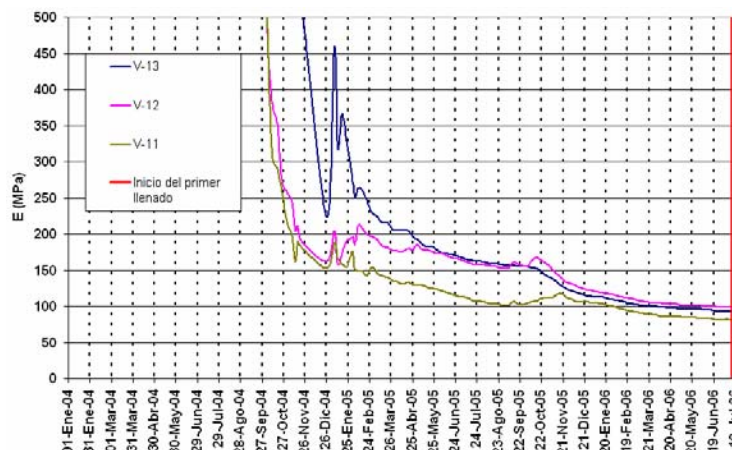


Fig. III.18. Módulos de deformación (Penman). Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.

Para tener una idea más clara de la diferencia entre los módulos de deformación de cada material se calcularon los promedios y así se logra una comparación cuantitativa y cualitativa entre los materiales.

Tabla. III.5. Módulos de deformación promedio (Penman).

Material	3B	T	3C
Módulo de deformación promedio (MPa)	76,6	104,1	64,3

Los mayores módulos de deformación en la etapa de construcción se presentaron en el material T, debido al mayor espesor del terraplén en esta zona y a la baja deformabilidad de este material. Un aspecto importante que se puede observar en los módulos de deformación



de los materiales que constituyen el enrocamiento de El Cajón es que a pesar de que sus valores son bajos, no existe mucha diferencia entre ellos. La importancia de lo anterior radica en que al ser de valores cercanos se esperan asentamientos relativamente uniformes en los tres materiales durante el primer llenado y operación de la presa. Esta situación reduce el riesgo de deformaciones excesivas en la cara de concreto y filtraciones a través de ésta como sucedió en Aguamilpa.

Dado que en el terraplén de la presa El Cajón se instalaron inclinómetros solamente en los materiales T y 3C, solo para estos se calcularon los módulos de deformación. El comportamiento que muestran los módulos de deformación es un reflejo de los asentamientos medidos durante la etapa de construcción y estos a su vez son influenciados por el avance del terraplén. Al aumentar los asentamientos, el módulo de deformación disminuye, es a éste valor al que se hace referencia como comparación de la deformabilidad entre un material y otro.

Los inclinómetros que se tomaron en cuenta para calcular los módulos de deformación en el material T fueron: el I-1, I-3 e I-5 en las secciones L-16, L-21 y L-26 respectivamente. El valor promedio del módulo fue entre 55 y 60 MPa.

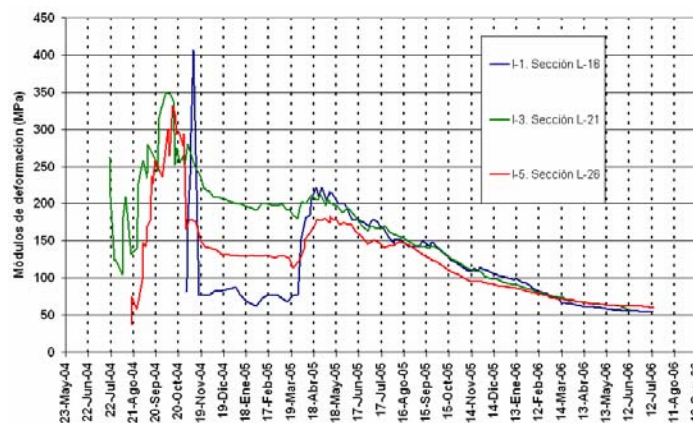


Fig. III.19. Módulos de deformación con inclinómetros. Material T.

En el material 3C, los módulos calculados mostraron un comportamiento muy similar entre los aparatos I-2, I-4 e I-6 (secciones L-16, L-21 y L-26, respectivamente), el valor promedio que se obtuvo para éste material fue entre 20 y 30 MPa.

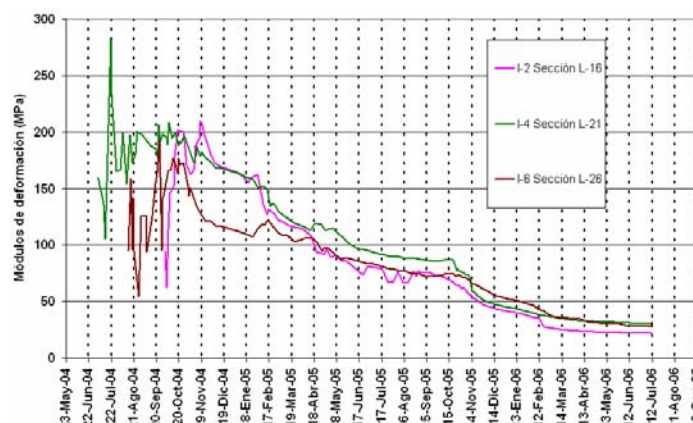


Fig. III.20. Módulos de deformación con inclinómetros. Material 3C.

Los módulos de deformación obtenidos en inclinómetros no se parecen a los calculados con NHA, esto es debido a las hipótesis y las características entre los métodos utilizados, sin embargo, se puede apreciar que los valores correspondientes al material T son prácticamente del doble que en el material 3C en ambos tipos de aparatos. Aún así no se



considera grande la diferencia entre los valores de los módulos de deformación y no se esperarán grandes diferencias en los asentamientos de estos materiales durante el llenado.

En la cortina de El Cajón se instalaron dos grupos de celdas de presión y extensómetros G-1 y G-2, ambos ubicados en la sección L-21 en la primer plataforma de instrumentación, con la diferencia de que el grupo G-1 se localiza a 80 m aguas arriba de la corona en el material 3B y el grupo G-2 a 20 m de la misma referencia en el material T.

A diferencia de Aguamilpa, en El Cajón se tomaban lecturas de los aparatos con mayor regularidad lo que permitió conocer mejor su comportamiento, a continuación se discutirán los resultados obtenidos para los módulos de deformación durante la construcción de la cortina.

El modulo de deformación calculado en el grupo 1 es de 43.52 Mpa. En la gráfica es posible percibir que la tendencia de los valores cambia cuando el embalse rebasa la cota de influencia sobre los aparatos.

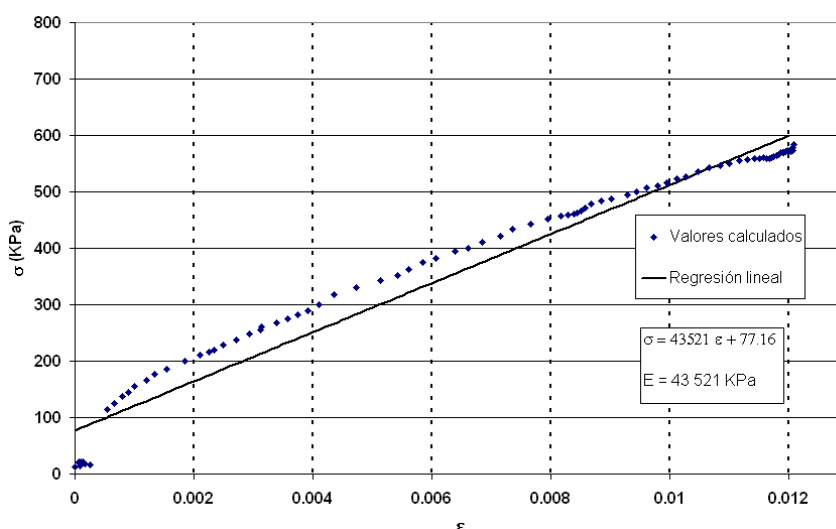


Fig. III.21. Módulos de deformación E, en el grupo G-1.

El comportamiento registrado para la zona donde se instaló el segundo grupo de celdas de presión y extensómetros (Material T) tuvo tendencias y valores muy distintos al otro grupo.

Los valores del módulo E tiene lapsos de incremento inicial, pero después del primer semestre de 2005 muestran un decremento. Los valores se estabilizan al inicio de 2006 terminando con una tendencia lineal, para después mostrar un cambio debido al efecto del primer llenado. Los cambios bruscos, súbitos y anormales se han asociado al fenómeno de arqueado debido a la interacción entre las laderas y el cuerpo del terraplén, donde se genera un esfuerzo debido al movimiento propio de los asentamientos y al deslizamiento del terraplén respecto a las laderas, dicho fenómeno altera el estado de esfuerzos dentro de la cortina. Por lo anterior los valores obtenidos de $E = 10,13$ MPa no son representativos para hacer una comparación entre el comportamiento de los materiales 3B y T, sin embargo nos permite tener conocimiento de que en esta zona de la cortina se desarrolló el fenómeno de arqueado durante la construcción.

III.2.3. Niveles de agua.

Para medir dichos niveles se colocaron diez piezómetros eléctricos atrás de la losa de concreto por debajo del nivel de la roca, distribuidos en cinco secciones (L-16, L-18, L-21, L-23 y L-26), además de que también se pueden medir los niveles en los tubos de los



inclinómetros. Los niveles de agua en el terraplén estuvieron regidos por el agua colocada durante la compactación del enrocamiento.

En la siguiente tabla se mencionan la ubicación de los piezómetros e inclinómetros así como la elevación de la roca en el lugar de instalación de cada aparato.

Tabla III.6. Ubicación de piezómetros e inclinómetros en el terraplén.

Sección	Aparato	Cadenamiento a partir del eje de la cortina. (m)	Elevación del sensor del piezómetro o del fondo del tubo del inclinómetro (m.s.n.m.)	Elevación de la roca en el lugar de instalación (m.s.n.m.)
L-16	PZE-1	0-211	233	236
	PZE-2	0-196	236	236
	I-1	0+000	251	264
	I-2	0+085	239	246
L-18	PZE-3	0-230	220	216
	PZE-4	0-199	230	216
L-21	PZE-5	0-230	218	216
	PZE-6	0-187	224	214
	I-3	0+000	217	225
	I-4	0+082	205	219
L-23	PZE-7	0-240	207	217
	PZE-8	0-222	214	216
L-26	PZE-9	0-221	222	226
	PZE-10	0-191	228	228
	I-5	0+000	227	230
	I-6	0+082	229	237

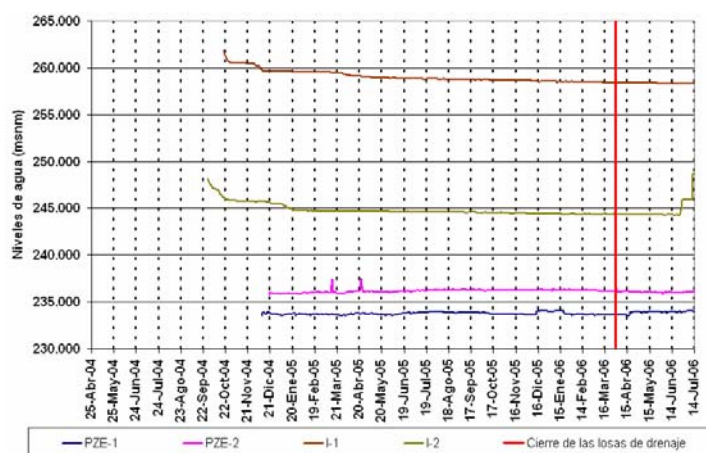


Fig. III. 22. Niveles de agua en la sección L-16.

En la sección L-16 se colocaron los piezómetros PZE-1 y PZE-2 los cuales midieron durante la construcción niveles en promedio a la elevación 235, por debajo del nivel de la roca. El inclinómetro I-1, ubicado en la zona central del terraplén y que tuvo mediciones iniciales a la elevación 262 descendiendo hasta la 258 al final de la construcción, y el I-2 localizado hacia aguas abajo con niveles iniciales a la elevación 248 y que al final de junio de 2006 tuvo el nivel a la cota 244, posteriormente comenzó a subir dicho nivel en este piezómetro hasta llegar a la 249 al inicio del primer llenado.

En la sección L-18 se instalaron los piezómetros eléctricos PZE-3 y 4; de los cuales el PZE-3 tuvo niveles iniciales aproximadamente a la cota 220, al principio del periodo de construcción sus mediciones variaban alrededor de la elevación 227 y a partir de julio de 2005 tuvo un nivel promedio de 221 m, su nivel sufrió variaciones bruscas en éste lapso de tiempo debido a la aplicación de agua en la compactación y a que ésta era drenada por la



losa de concreto. A finales de marzo de 2006 el nivel piezométrico llega a la elevación 221 y tiene un aumento hasta un máximo a 225,5 m generado por el taponamiento de los drenes. Al término de la construcción el nivel del aparato fue de 224 m.

El piezómetro PZE-4 tuvo un comportamiento casi constante ya que entre los años 2004 y 2006 varió de la cota 231 a la 230, valor que tuvo al final de la construcción, éste aparato no registró cambio alguno por el cierre de los drenes.

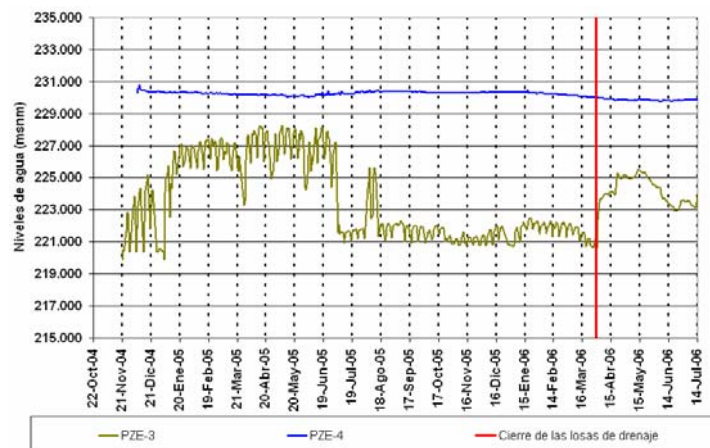


Fig. III.23. Niveles de agua en la sección L-18.

En la sección L-21 se colocaron los piezómetros PZE-5 y 6 y los inclinómetros I-3 e I-4, el aparato PZE-5 tuvo mediciones iniciales de 217 m, durante el año de 2005 sus niveles variaron por el nivel 226 los primeros meses y en agosto comenzó a descender para llegar a la cota 220 al final del año, éste aparato registró un aumento de nivel al cierre de los drenes de las losas su nivel al final de la construcción fue de 224 m.

El piezómetro PZE-6 tuvo mediciones iniciales a la elevación 225 y mantuvo valores en el rango de la cota 227 durante toda la etapa de construcción, no manifestó cambios importantes por el cierre de los drenes y su nivel al final de la construcción fue de 225 m.

El inclinómetro I-3 localizado en la zona de la corona registró niveles iniciales de agua a la elevación 225, durante la etapa de construcción sus niveles oscilaron entre las cotas 226 y 228, en los últimos meses de la construcción descendieron a 226 m.

El otro inclinómetro instalado en la sección L-21 (I-4) inicialmente registraba la misma tendencia que el I-4 pero con valores 3 m menores, sin embargo, a partir de junio de 2005 sus niveles redujeron súbitamente a la cota 223, el cual mantuvo hasta el final de la construcción.

En ésta sección si se alcanza a percibir un aumento en los niveles de agua después del cierre de los drenes.

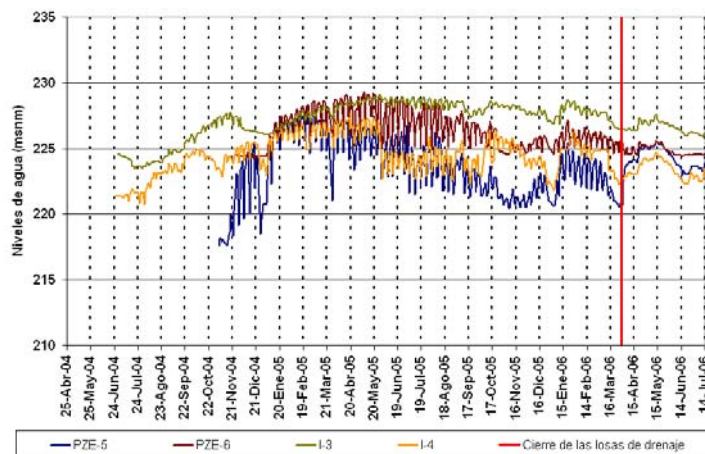


Fig. III.24. Niveles de agua en la sección L-21.

Los piezómetros PZE-7 y PZE-8 fueron instalados en la sección L-23, el aparato PZE-7 tuvo mediciones iniciales a la elevación 208, su comportamiento fue constante durante la etapa de construcción variando entre las cotas 211 y 212; al cierre de los drenes experimentó un brinco de 7 m aproximadamente, tuvo un incremento posterior con un pico a la elevación 218 y su nivel al final de la construcción fue de 217 m.

El piezómetro PZE-8 registró niveles a la cota 214 durante toda la construcción teniendo picos a la elevación 215 durante el 2004, también muestra un incremento al cierre de los drenes, en éste caso de 9 m, posteriormente sigue el mismo patrón de comportamiento que el PZE-7 llegando a un máximo a la cota 225 y un nivel final de 223 m.

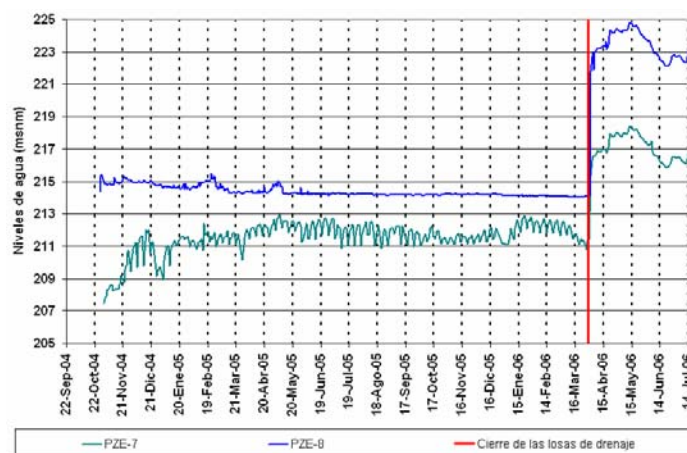


Fig. III.25. Niveles de agua en la sección L-23.

En la sección L-26 se instalaron los aparatos PZE-9 y PZE-10 y los inclinómetros I-5 e I-6, en el piezómetro PZE-9 se midió 221 m como nivel inicial, a lo largo de la construcción tuvo variaciones bruscas debido a la cercanía con la losa de concreto y por tanto con los drenes, sus niveles oscilaban entre las cotas 221 y 228, a la fecha del cierre de dichos drenes su nivel era de 222 m, el cual subió 1,5 m inicialmente y al final de la construcción llegó al nivel 223 m.

El aparato PZE-10 tuvo un nivel inicial de 228 m, su comportamiento fue constante llegando al nivel 227 al final de la construcción, sus únicos cambios bruscos los presentó durante el 2005 con un rango de variación de 2 m.

Los inclinómetros ubicados en la sección L-26 también tuvieron un comportamiento constante y similar entre ellos con niveles iniciales a la cota 236 y finales a la 235 sin variaciones importantes durante toda la etapa de construcción.

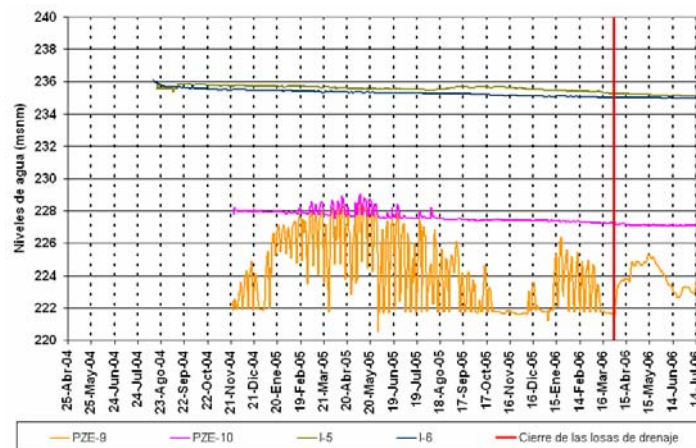


Fig. III.26. Niveles de agua en la sección L-26.

En el caso de los piezómetros PZE-3, PZE-5, PZE-7 y PZE-9, su comportamiento siguió la misma tendencia de niveles que variaban súbitamente, y un aumento brusco de la cota inmediatamente después del cierre de los drenes, esto es debido a que estos aparatos se localizan a unos cuantos metros de la losa de concreto donde estaban ubicados los drenes. Las variaciones que presentaban durante la construcción se debían a la aplicación de agua en la compactación del enrocamiento, la cual utilizaba esa ruta hacia los drenes, al cerrarse estos, los niveles piezométricos aumentaron al no poder drenar el agua por ahí.

Este fenómeno se vio reflejado en los niveles de la sección L-21, por estar ubicada sobre el cauce natural del río formó parte de la salida del agua que ya no podía drenar por la cara de concreto, teniendo la misma tendencia de los piezómetros mencionados y los aparatos instalados en la sección L-21.

III.2.4. Deformaciones en la cara de concreto.

Para medir las deformaciones en la cara de concreto durante la etapa de construcción se emplearon: referencias topográficas, extensómetros tridimensionales en la junta losa-plinto e inclinómetros inclinados.

Las referencias de concreto fueron colocadas en dos líneas: una longitudinal a la elevación 327 y otra transversal en la sección L-21. Con estas dos líneas se midieron asentamientos y desplazamientos horizontales.

El máximo asentamiento en la elevación 327 medido en referencias topográficas al final de la construcción (al 16 de julio de 2006) fue de 14,8 cm al centro de la cortina (sección L-22).

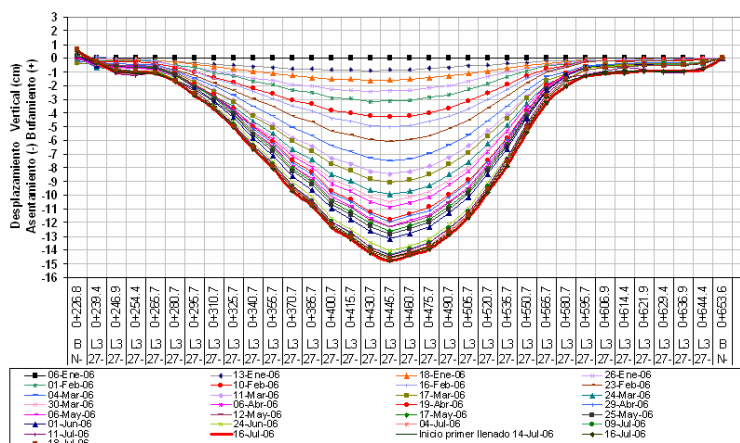


Fig. III.27. Asentamientos en cara de concreto. Elev. 327.

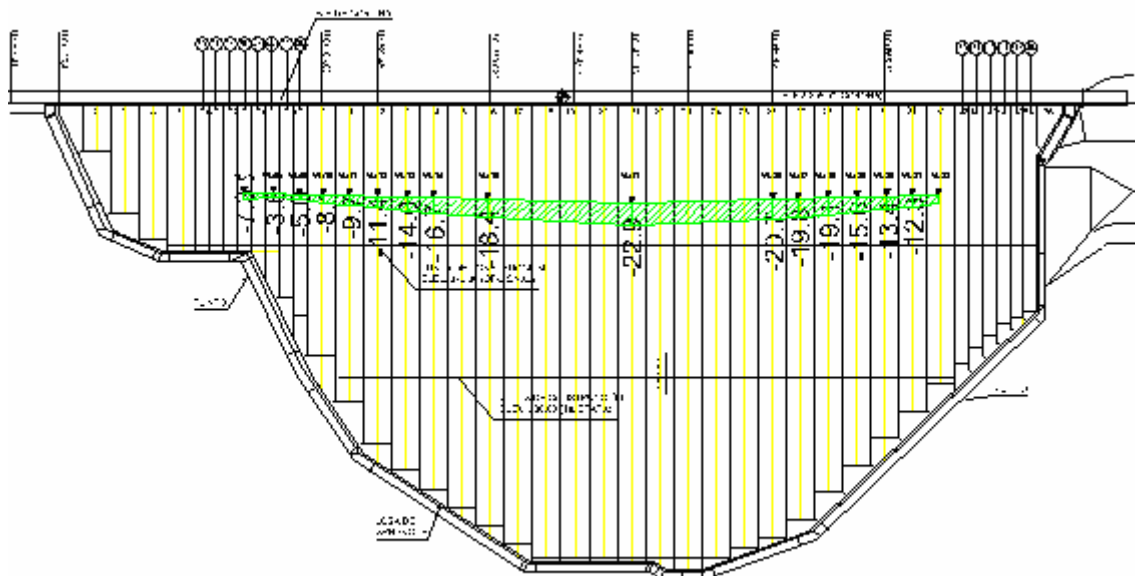


Fig. III.28. Asentamientos en cara de concreto. Elev. 327.

En la línea transversal que pasa por la sección L-21, el máximo asentamiento de 23 cm sucedió en la pija L-21 que se ubica a la elevación, en la siguiente figura se muestran los asentamientos en ésta línea durante la etapa de construcción.

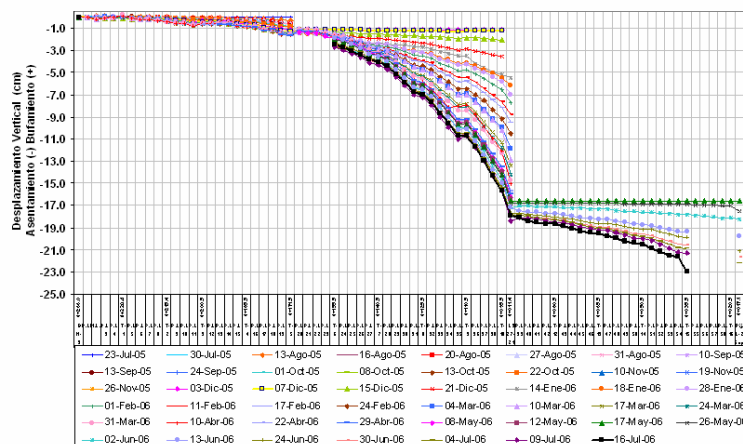
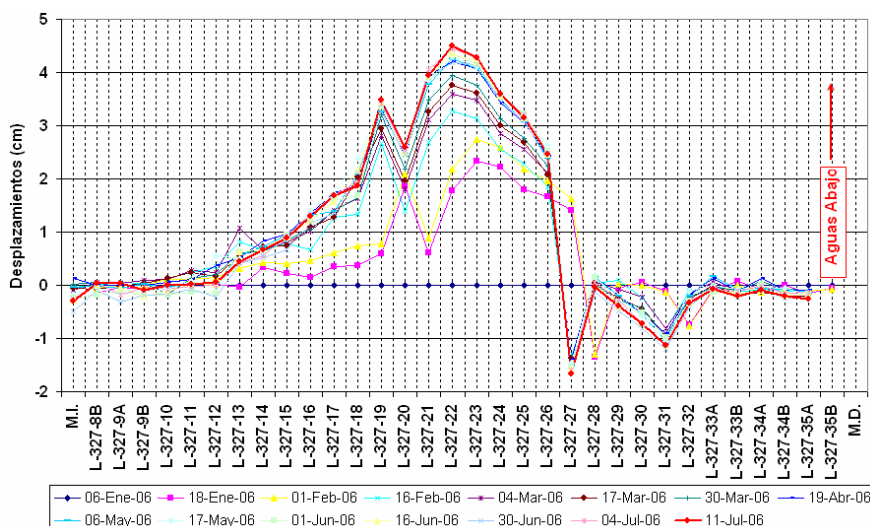


Fig. III.29. Asentamientos en cara de concreto. Sección L-21.

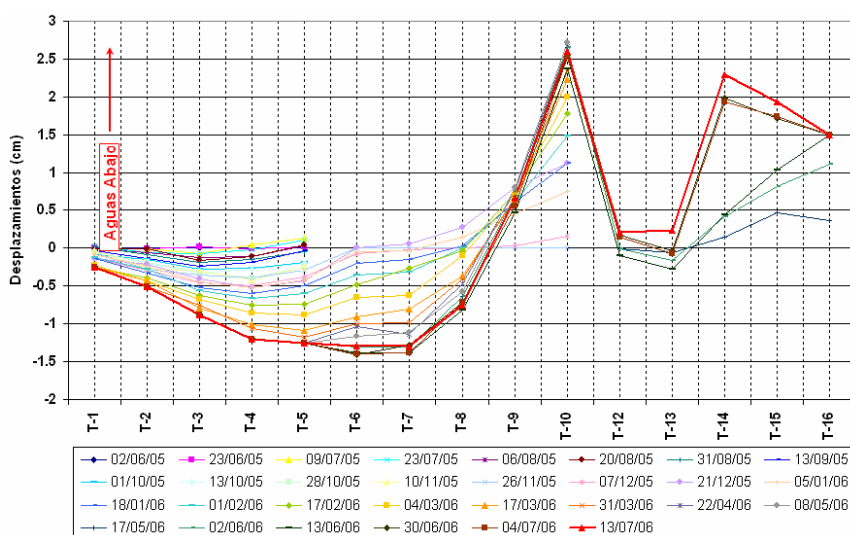
En la línea ubicada a la elevación 327 los desplazamientos en la dirección eje río fueron hacia aguas abajo, en las losas cercanas a margen izquierda y las losas centrales, y hacia aguas arriba en las losas ubicadas hacia margen derecha. El mayor desplazamiento se midió en la losa L-22 con 4,5 cm al 11 de julio de 2006, para el mismo día el mayor desplazamiento fue de 1,7 cm en la losa L-27.



**Fig. III.30. Desplazamientos horizontales en cara de concreto.
Eje del río. Elev. 327.**

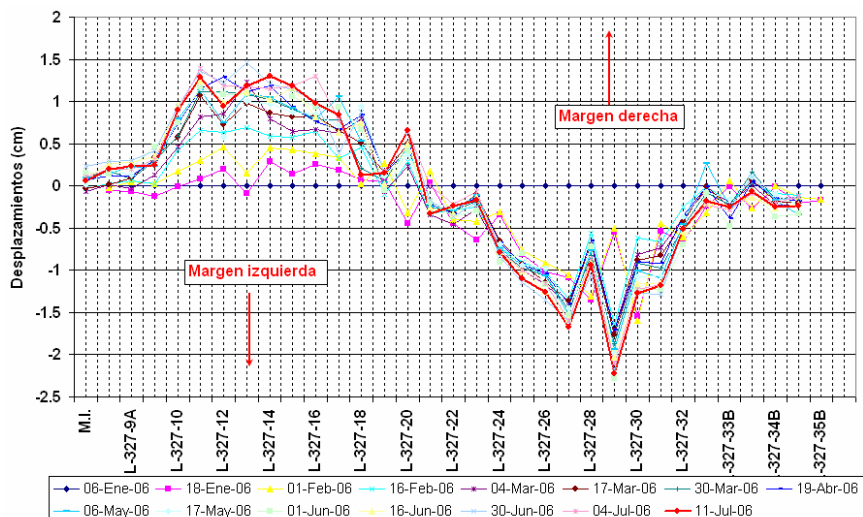
En la línea transversal no se tuvieron las mismas fechas bases, pues estas dependían del avance de la construcción de las losa, por lo que las referencias T-1 al T-10 no son comparables con las superiores, además de que en las primeras no se tienen mediciones posteriores al 26 de noviembre de 2006 (fecha base de las referencias T-12 a T-16). Por tanto, para comparar los movimientos en la dirección de la cortina durante el periodo de construcción en la losa L-21 solo se utilizarán las referencias T-1 a la T-10.

En las referencias inferiores (del T-1 al T-8) el movimiento fue hacia aguas abajo con un máximo de 1,3 cm en el T-7, en las referencias superiores el movimiento fue hacia aguas arriba con el máximo de 2,6 cm en la referencia T-10.



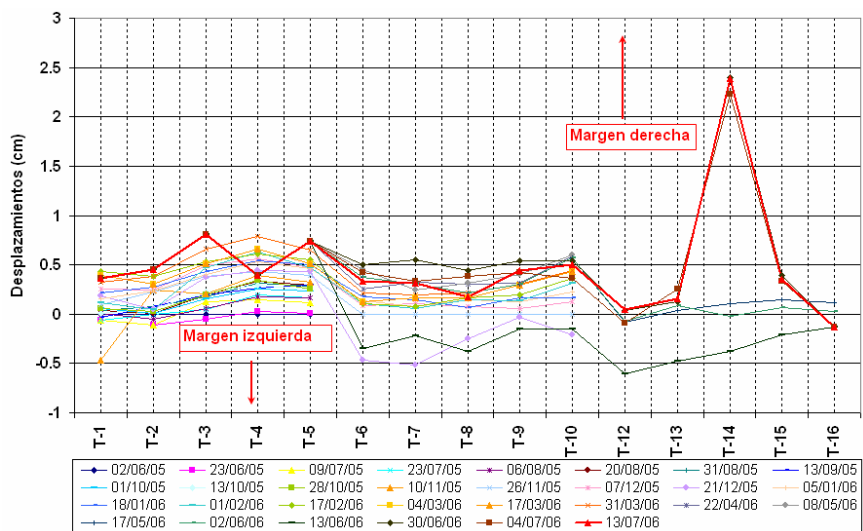
**Fig. III.31. Desplazamientos horizontales en cara de concreto.
Eje del río. Sección L-21.**

Los desplazamientos horizontales en la dirección eje cortina son preferentemente hacia el centro del cauce. A la elevación 327 desplazamiento máximo hacia margen derecha es 1,3 cm en la losa L-14, mientras hacia margen derecha el desplazamiento fue de 2,2 cm en la losa L-29, dichas mediciones tomadas el 11 de julio de 2006.



**Fig. III.32. Desplazamientos horizontales en cara de concreto.
Eje de la cortina. Elev. 327.**

En la línea transversal de la sección L-21 los desplazamientos en dirección de la cortina son menores de 1,0 cm, a excepción de la referencia T-14 ubicada a la elevación 355 y que tuvo un desplazamiento de 2,4 cm hacia margen derecha con datos medidos el 13 de julio de 2006.



**Fig. III.33. Desplazamientos horizontales en cara de concreto.
Eje de la cortina. Sección L-21.**

Al inicio del primer llenado únicamente se encontraban instalados los extensómetros tridimensionales de las losas: L-10, L-12, L-16, L-21, L-23, L-26 y L-30. Los demás aparatos se instalaron una vez iniciada la etapa de primer llenado.

En la dirección X todos los aparatos marcaban cierre de la junta losa-plinto a excepción de las losas 8 y 30 (aparatos a las mayores elevaciones), estos dos últimos marcaban una medición de apertura pero su tendencia era también de cierre. Al día 14 de julio de 2006 el máximo desplazamiento de cierre fue de 3,1 mm en la losa L-23 ubicada al centro del cauce.

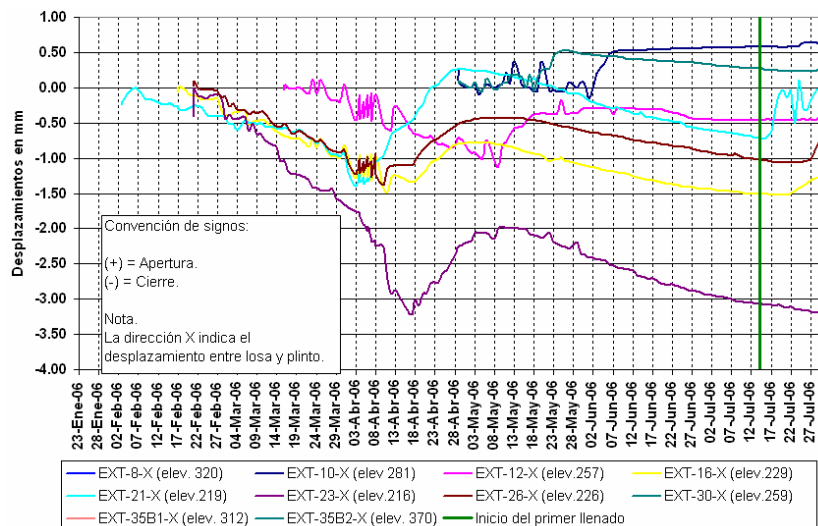


Fig. III.34. Movimientos de apertura o cierre de la junta losa-plinto (Dirección X). Extensómetros tridimensionales.

En la dirección Y, los aparatos instalados en la margen izquierda de la presentaron las mayores movimientos con un máximo de 3,5 mm al 14 de julio de 2006 en la losa L-16, con dirección hacia el cauce, los demás aparatos instalados también mostraban deslizamientos hacia el centro del cauce a excepción de los colocados en las losas centrales (L-21 y L-23) los cuales no mostraron movimiento superior a 0,1 mm.

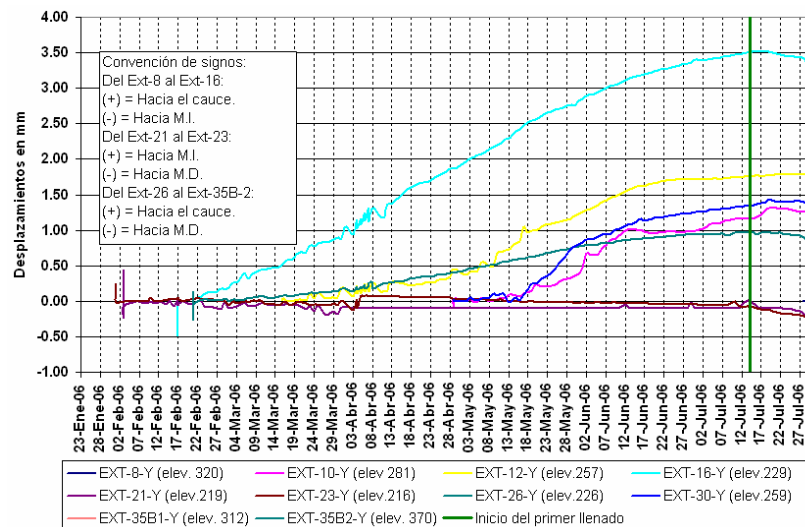
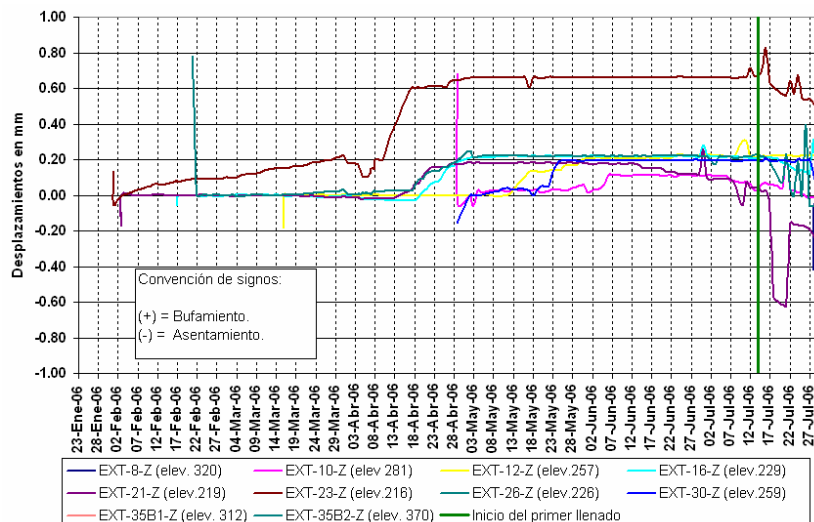


Fig. III.35. Movimientos perpendiculares al cauce (Dirección Y). Extensómetros tridimensionales.

Los movimientos en dirección Z (asentamientos o bufamientos) fueron casi nulos, en la mayoría de los aparatos se midieron menos de 0,2 mm, a excepción de la losa L-23 en donde se marcó 0,7 mm.

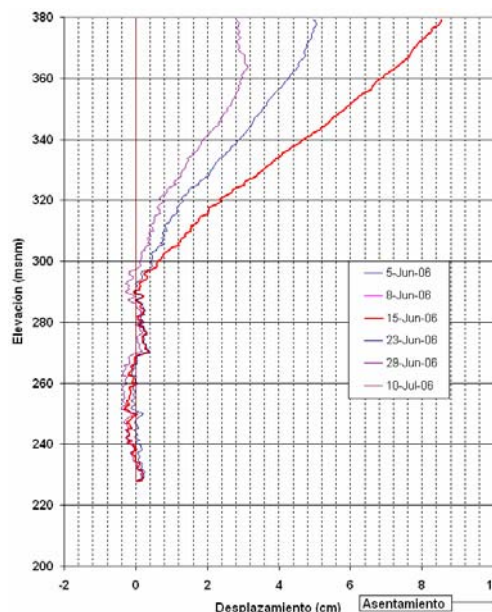


**Fig. III.36. Movimientos normales a la losa (Dirección Z).
Extensómetros tridimensionales.**

Se instalaron tres inclinómetros inclinados dentro de la cara de concreto a lo largo de toda una losa y permiten conocer los desplazamientos normales en las secciones L-16, L-21 y L-26.

Para éste trabajo se analizarán las mediciones finales de la etapa de construcción correspondientes a la última etapa de colado de las losas, tomando como fechas bases el 17 de abril de 2006 en el caso del IL-21 y el 5 de mayo de 2006 para el IL-16 y el IL-26.

En el inclinómetro IL-16 se midió al final de la construcción desplazamientos menores a 0,5 cm en su parte inferior, los mayores desplazamientos fueron en la zona cercana a la boquilla, teniendo el máximo asentamiento en la parte superior de 8,6 cm. Su deformación presentó una sola curvatura.

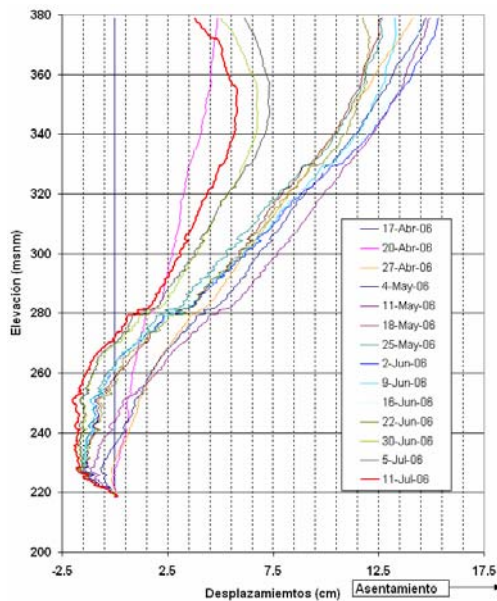


**Fig. III.37. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclinómetros inclinados. IL-16. Sección L-16.**

Para la zona central de la cortina se colocó el inclinómetro IL-21, éste aparato presentó una doble curvatura en su configuración, teniendo en la zona inferior un bufamiento con un desplazamiento máximo de 2,0 cm y en la parte superior asentamientos de hasta 2,8 cm, al

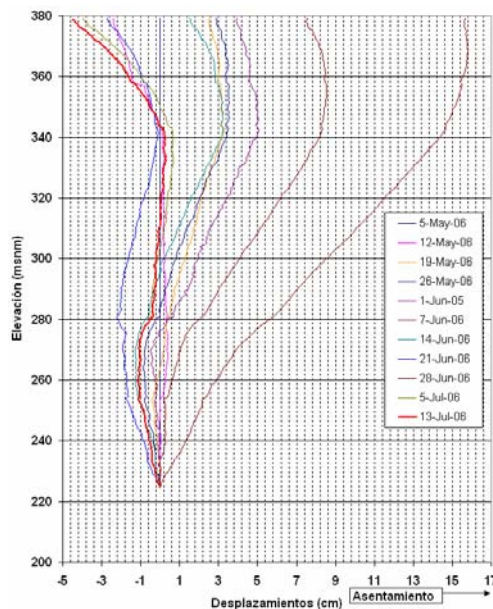


día 11 de julio de 2006. En mediciones anteriores se puede notar que a pesar de tener asentamientos, la tendencia de la cara de concreto en esta etapa de construcción es al bufamiento.



**Fig. III.38. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclínómetros inclinados. IL-21. Sección L-21.**

En el aparato IL-26, las primeras mediciones presentaban la tendencia a asentarse, pero en las últimas lecturas la losa bufaba paulatinamente. El 13 de julio de 2006 prácticamente en toda la longitud del inclinómetro se registran bufamientos, además de presentar una doble curvatura con un pico inferior de 1,1 cm y el máximo superior de 4,4 cm en la boquilla del aparato.



**Fig. III.39. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclínómetros inclinados. IL-26. Sección L-26.**



IV COMPORTAMIENTO DURANTE EL LLENADO

IV.1. Programa de llenado del embalse.

IV.1.1. Llenado teórico.

En la Gerencia de Proyectos Hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad se realizaron análisis estadísticos con las avenidas registradas entre 1949 y 1999, con el objeto de programar adecuadamente el cierre final del desvío y la construcción del terraplén, con dichos análisis se obtuvieron curvas de llenado para diferentes condiciones de escurrimiento y con diferentes fechas de inicio del llenado.

Las fechas estudiadas fueron durante el mes de julio, dado que el primer llenado comenzó el día 14 de julio aquí se mencionarán únicamente los resultados obtenidos para este día, los cuales se resumen en la siguientes tabla y figura.

Tabla IV.1. Programa de llenado con inicio el 14 de julio de 2006.

	Niveles	Muy húmedo	Húmedo	Medio	Seco	Muy seco
Ataguía a. arriba y plataforma de obturadores	268.5	6 días	10 días	11 días	13 días	17 días
		20-Jul-06	24-Jul-06	25-Jul-06	27-Jul-06	31-Jul-06
Canal de llamada de obra de toma	322.402	12 días	21 días	32 días	45 días	80 días
		26-Jul-06	04-Ago-06	15-Ago-06	28-Ago-06	02-Oct-06
NAMINO	346	15 días	34 días	49 días	72 días	247 días
		29-Jul-06	17-Ago-06	01-Sep-06	24-Sep-06	18-Mar-07
Plataforma de cierre final	355	16 días	39 días	62 días	95 días	327 días
		30-Jul-06	22-Ago-06	14-Sep-06	17-Oct-06	06-Oct-07
Cresta del vertedor	372	18 días	49 días	96 días	264 días	405 días
		01-Ago-06	01-Sep-06	18-Oct-06	04-Abr-07	23-Ago-07
NAMO	391	25 días	74 días	267 días	376 días	571 días
		08-Ago-06	26-Sep-06	07-Abr-07	25-Jul-07	05-Feb-07

Las curvas de llenado se hicieron para cinco diferentes condiciones climatológicas, que van desde un año muy húmedo hasta un año muy seco, en la tabla anterior se muestran los días en que se espera llegue el nivel de la presa para cada condición.



IV.1.2. Llenado real.

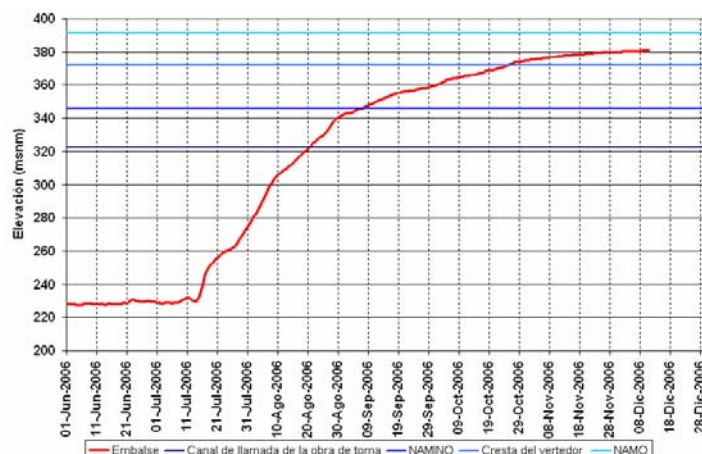


Fig. IV. 1. Nivel del embalse durante el primer llenado.

El periodo del primer llenado en el P. H. El Cajón inició el día 14 de julio de 2006 y para fines de esta Tesis se consideró como fecha final el 4 de diciembre de 2006, debido a que para este día la velocidad de llenado ya había disminuido de tal modo que es posible considerarla constante.

Comparando la curva real de llenado con las predicciones estadísticas se puede decir que las condiciones de llenado del El Cajón fueron las de un año medio como se puede apreciar en la siguiente figura.

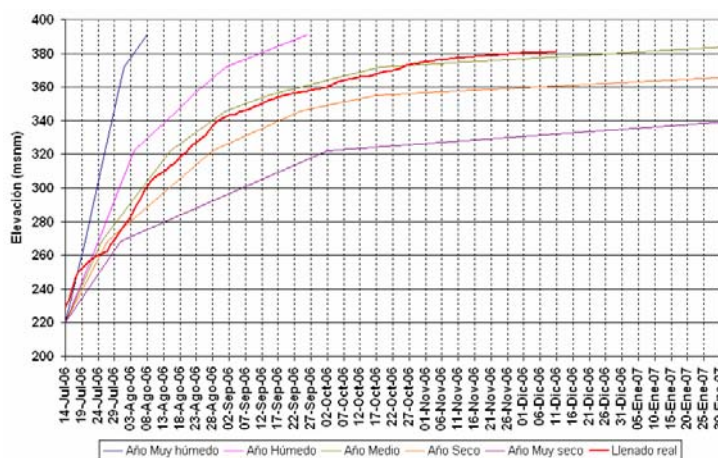


Fig. IV.2. Curvas teóricas y real de llenado.

IV.2. Deformaciones de la presa.

En el terraplén se midieron deformaciones en dirección horizontal y asentamientos con los siguientes aparatos: NHA (niveles hidráulicos de asentamientos), inclinómetros, referencias topográficas y celdas eléctricas de asentamientos.

IV.2.1. Asentamientos.

Las fechas bases utilizadas para los NHA corresponde a las de instalación, con el propósito de observar la diferencia entre las deformaciones durante la construcción y el primer llenado. Para la segunda etapa no se utilizarán las fechas base del inicio del primer llenado pues los efectos de la sobrecarga comenzaron días después del cierre.



Tabla IV. 2. Comparación entre asentamientos de cada material.

Sección	Elevación (m.s.n.m.)	Material	Aparato	Fecha de instalación	Asentamiento después de construcción (cm)	Fecha de cambio de tendencia	Asentamiento durante el primer llenado (cm)	Asentamiento Total (cm)
L-16	290	3B	V-28	17-Jun-05	27,5	25-Ago-06	8,2	35,7
		T	V-32	18-May-06	50,5	5-Sep-06	3,9	54,4
		3C	V-35	28-Feb-05	41,6	8-Sep-06	1,7	43,3
	330	3B	V-57	20-Dic-05	31,2	30-Ago-06	9,3	40,5
		T	V-60	26-Nov-05	62,7	14-Oct-06	4,1	66,8
		3C	V-63	29-Nov-05	51,1	31-Oct-06	1,8	52,9
L-21	245	3B	V-3	28-Ene-05	24,4	3-Ago-06	12,1	36,5
		T	V-9	20-Sep-04	43,3	7-Sep-06	3,0	46,3
		3C	V-12	15-Sep-04	41,8	18-Sep-06	1,2	43,0
	290	3B	V-37	9-Jul-05	36,2	22-Ago-06	14,6	50,8
		T	V-42	16-May-05	87,3	12-Sep-06	6,0	93,3
		3C	V-44A	8-Abr-05	73,6	19-Sep-06	3,3	76,9
	330	3B	V-65	26-Nov-05	47,7	2-Sep-06	11,1	58,8
		T	V-68	1-Dic-05	74,5	7-Oct-06	5,5	80,0
		3C	V-71	3-Dic-05	60,4	24-Oct-06	3,1	63,5
L-26	245	3B	V-16	27-Ene-05	22,1	3-Ago-06	12,1	34,2
		T	V-21	8-Sep-04	32,0	31-Ago-06	3,6	35,6
		3C	V-25	24-Ago-04	11,1	14-Sep-06	0,4	11,5
	290	3B	V-48	14-Jun-05	46,1	18-Ago-06	12,0	58,1
		T	V-52	14-May-05	79,0	26-Sep-06	4,7	83,7
		3C	V-54A	7-Abr-05	57,7	3-Oct-06	2,2	59,9
	330	3B	V-73	25-Nov-05	41,5	9-Sep-06	9,7	51,2
		T	V-76	30-Nov-05	69,8	14-Oct-06	4,7	74,5
		3C	V-79	1-Dic-05	56,3	3-Nov-06	2,6	58,9

Durante la etapa del primer llenado el mayor asentamiento fue de 19,2 cm en el NHA V-36 que se localiza en la sección L-21 a la elevación 290, y tomando en cuenta el inicio de los efectos del primer llenado (fecha base del 8 de agosto de 2006 para el aparato V-36) el asentamiento es de 18,6 cm. Con el primer llenado los mayores asentamientos se presentan en el material 3B por ser los más próximos a la cara de concreto. En el material 3C los asentamientos asociados al llenado son pequeños.

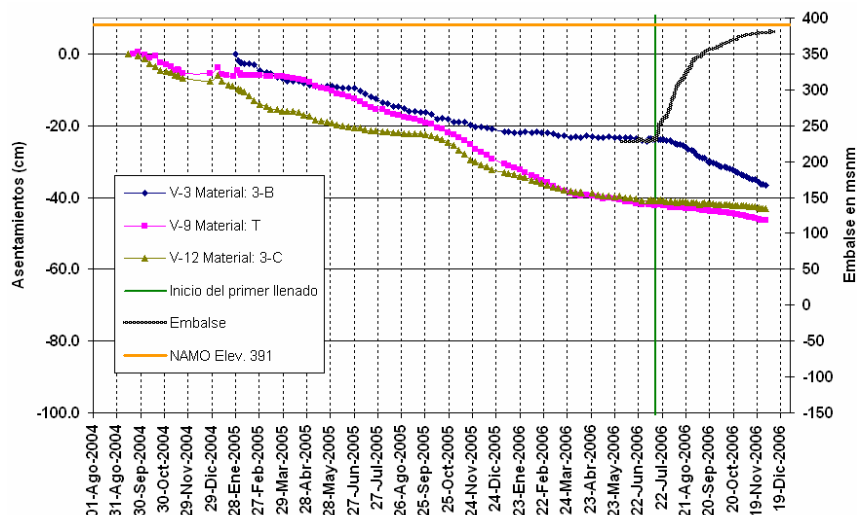




Fig. IV.3. Comparación entre materiales. Sección L-21. Elev. 245.

En general, los máximos asentamientos del terraplén se dieron detrás de la cara de concreto, y fueron mayores de 19,2 cm en el aparato V-36 localizado en la sección L-21 de la elevación 290.

Tabla IV. 3. Asentamientos medidos en NHA atrás de la cara de concreto.
Inicio del primer llenado.

Elevación (msnm)	Sección					
	L-16		L-21		L-26	
	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)
245	----	----	V-1	8,2	V-14	6,8
290	V-26	8,2	V-36	18,6	V-46	17,0
330	V-56	16,6	V-64	28,9	V-72	24,8
361	VL-16	18,7	VL-21	23,2	VL-26	20,7

Tabla IV. 4. Asentamientos medidos en NHA atrás de la cara de concreto.
Después del primer llenado.

Elevación (msnm)	Sección					
	L-16		L-21		L-26	
	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)
245	----	----	V-1	25,9	V-14	23,2
290	V-26	21,1	V-36	37,8	V-46	35,1
330	V-56	29,4	V-64	44,7	V-72	39,5
361	VL-16	29,0	VL-21	35,9	VL-26	32,9

Tabla IV. 5. Asentamientos medidos en NHA atrás de la cara de concreto.
Fecha base del primer llenado al 4 de diciembre de 2006.

Elevación (msnm)	Sección					
	L-16		L-21		L-26	
	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)	Aparato	Asentamiento (cm)
245	----	----	V-1	17,7	V-14	16,4
290	V-26	12,9	V-36	19,2	V-46	18,1
330	V-56	12,8	V-64	15,8	V-72	14,8
361	VL-16	10,3	VL-21	12,7	VL-26	12,2

Los efectos del primer llenado no se notaron inmediatamente en los asentamientos del terraplén, pero si en los aparatos mas cercanos a la cara de concreto. En la siguiente tabla se muestran las fechas a las que se dio el cambio para cada caso y el asentamiento real debido al primer llenado.

Tabla IV. 6. Asentamientos medidos en NHA atrás de la cara de concreto.
Efecto real del primer llenado.

Elevación (msnm)	Sección								
	L-16			L-21			L-26		
	Aparato	Fecha Base	Asentamiento (cm)	Aparato	Fecha Base	Asentamiento (cm)	Aparato	Fecha Base	Asentamiento (cm)
245	----	----	----	V-1	7-Ago-06	16,9	V-14	3-Ago-06	15,6
290	V-26	11-Ago-06	12,6	V-36	8-Ago-06	18,6	V-46	11-Ago-06	17,2
330	V-56	30-Ago-06	11,5	V-64	30-Ago-06	13,9	V-72	26-Ago-06	13,8
361	VL-16	13-Sep-06	7,8	VL-21	25-sep-06	8,4	VL-26	14-Sep-06	9,2



Tomando en cuenta el inicio real de los efectos del primer llenado en el terraplén, se observa que los mayores asentamientos se presentan a la elevación 290, en particular en la sección L-21 con el valor de 18,6 cm en el aparato V-36. En las siguientes figuras se muestra el desarrollo de los asentamientos de esta zona a lo largo del tiempo considerando la etapa de construcción y con fecha base de la instalación de cada aparato.

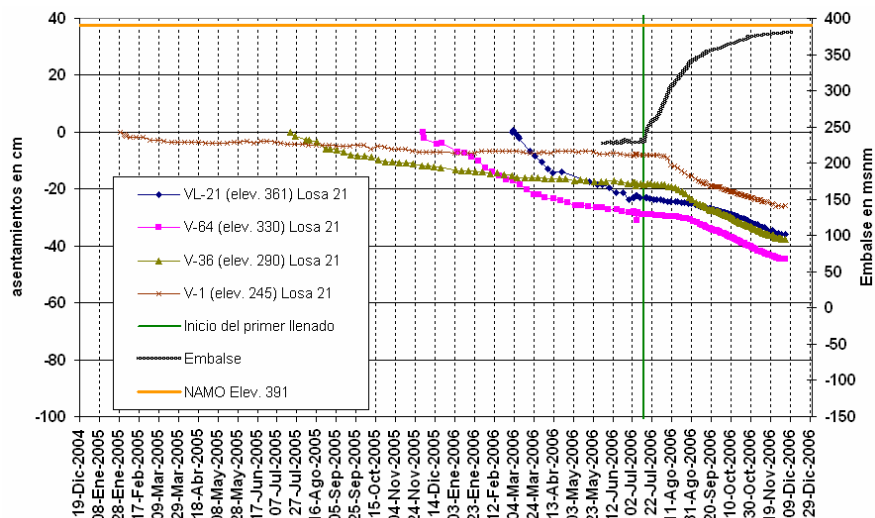


Fig. IV. 4. Asentamientos en losas concreto. Sección L-21.

En la elevación 361, detrás de la cara de concreto se colocó una línea de NHA en varias losas, con estos aparatos se pueden comparar los asentamientos en dirección del eje de la cortina. En la sección máxima, después de la construcción el asentamiento máximo en esta línea fue de 23,2 cm, al inicio del primer llenado fue de 12,7 cm, al inicio del efecto del llenado (25 de septiembre de 2006) es de 8,4 cm y al final del primer llenado fue de 35,9 cm,

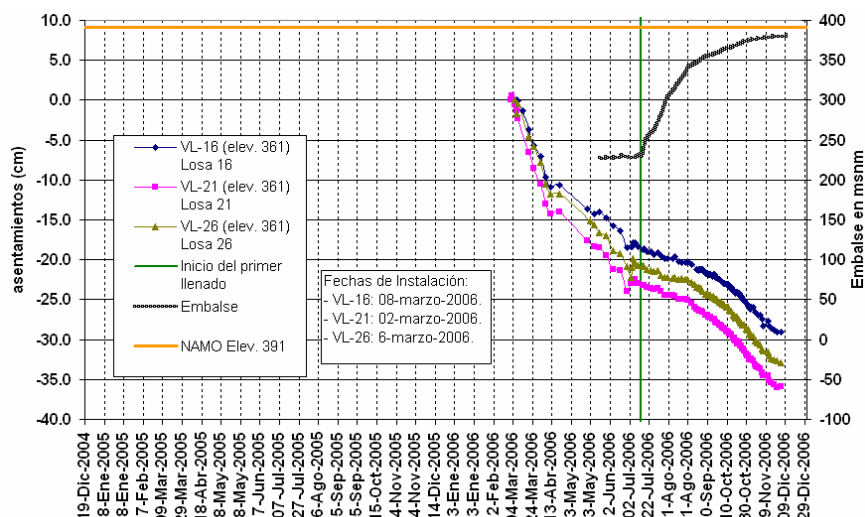


Fig. IV.5. Asentamientos en losas concreto. Elev. 361.

Comparando los asentamientos en diferentes losas, se puede apreciar que los valores son mayores en las losas centrales y hacia las márgenes las deformaciones disminuyen. Hacia margen izquierda es donde se presentan los menores valores debido a las condiciones topográficas.

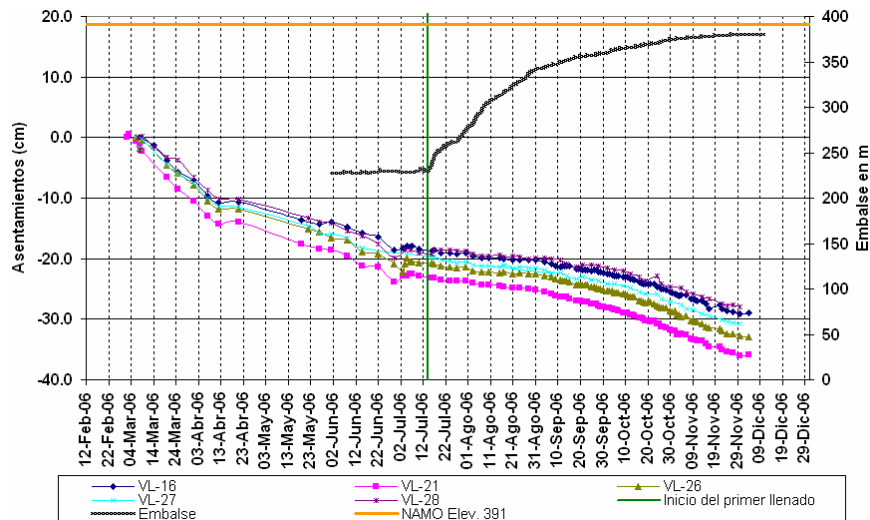


Fig. IV.6. Asentamientos en losas concreto. Elev. 361. Losas Centrales.

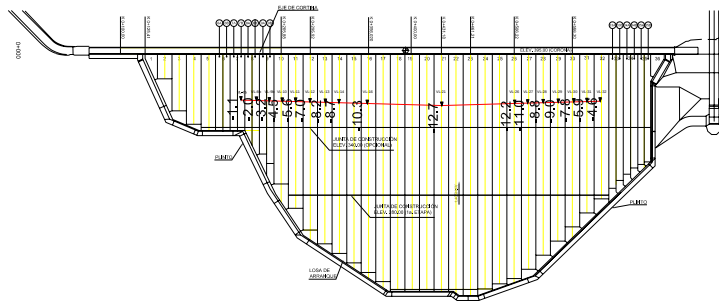


Fig. IV.7. Asentamientos en losas concreto. Elev. 361. Fecha base del primer llenado.

En las celdas eléctricas de asentamiento instaladas detrás de la cara de concreto a la elevación 361, las mediciones se tomaron a partir del 20 de julio de 2006, para la fecha del 30 de noviembre del mismo año todas las celdas registraron asentamientos con valor máximo de 23,7 cm.

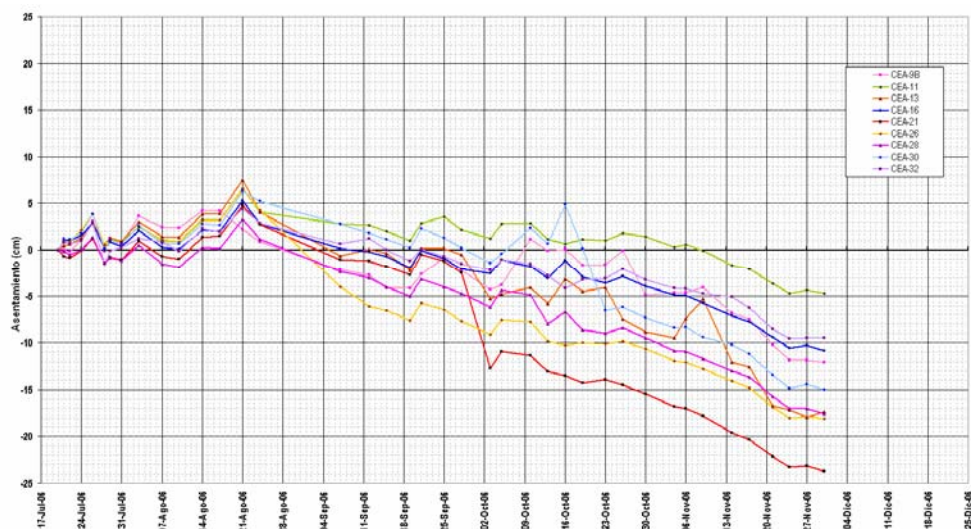


Fig. IV.8. Asentamientos en cara de concreto. Elev. 361.
Celdas eléctricas de asentamiento.



Los asentamientos registrados en los inclinómetros, fueron máximos en la parte superior de los aparatos, principalmente en los de mayor altura de la sección L-21. En estos aparatos se tomó como fecha base el 21 de julio de 2006.

En la sección L-16 se instalaron los inclinómetros I-1 y I-2, el mayor desplazamiento fue en la boquilla del aparato I-1 con 10,0 cm al 30 de noviembre de 2006, en el inclinómetro I-2 se midió el asentamiento máximo de 5,10 cm.

El valor máximo medido en inclinómetro se registro en el aparato I-3 a la elevación 389 con 11,5 cm de asentamiento. En el I-4 se midió un asentamiento máximo de 6,6 cm en la parte superior del terraplén.

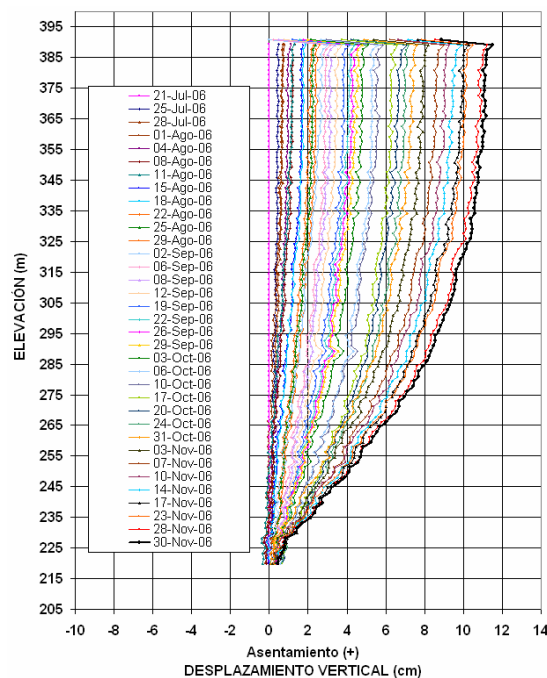


Fig. IV.9. Asentamientos en inclinómetros. I-3. Sección L-21.

Los inclinómetros I-5 e I-6 se instalaron en la sección L-26, el máximo asentamiento medido en esta sección fue de 10,8 cm en la boquilla del aparato I-5, en el inclinómetro I-6 el desplazamiento máximo también fue en la boquilla con valor de 5,5 cm.

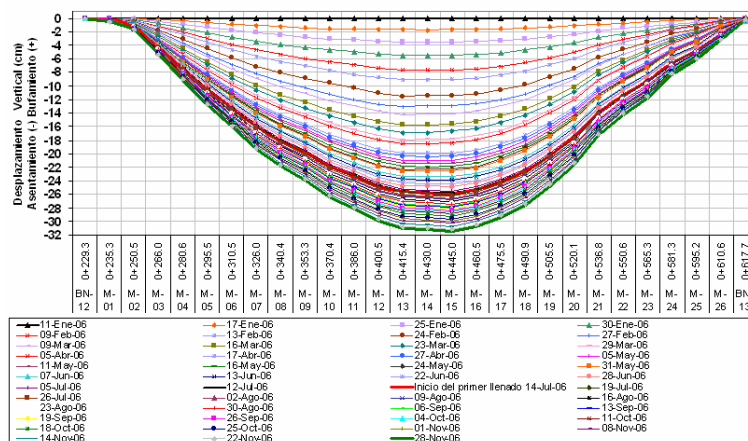
Tabla IV.7. Asentamientos máximos en inclinómetros al final del primer llenado.

Aparato	Sección	Número de tubos	Tubo del mayor asentamiento	Asentamiento Máximo (cm)
I-1	L-16	84	84	10,0
I-2	L-16	56	56	5,1
I-3	L-21	105	104	11,5
I-4	L-21	77	75	6.6
I-5	L-26	98	98	10,8
I-6	L-26	64	64	5,5

En la cortina de El Cajón las referencias topográficas del enrocamiento fueron dispuestas en cuatro líneas a diferentes elevaciones y una línea transversal en el eje de la sección L-21. En la línea de la elevación 245 el máximo asentamiento después de la construcción fue de 1,7 cm en el aparato M-6, al final del primer llenado el mayor asentamiento fue en la misma referencia de 1,9 cm, por lo que durante el llenado solamente se asentó 0,2 cm. Tomando como fecha base el inicio del primer llenado el mayor asentamiento fue en la referencia M-4 de 0,3 cm.



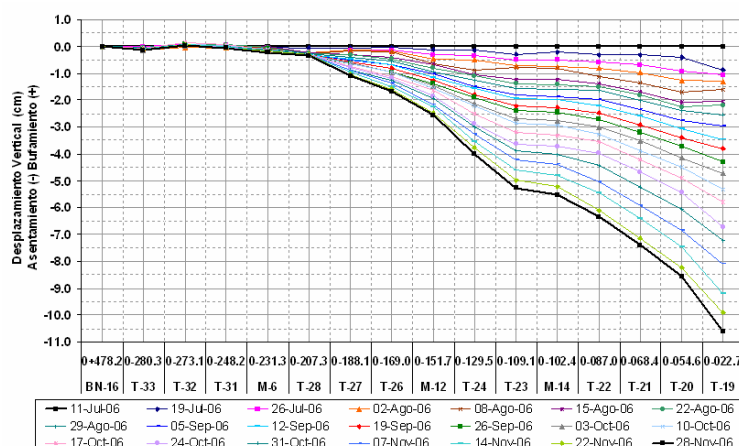
Al inicio de la etapa de construcción el máximo asentamiento a la elevación 290 fue de 23,1 cm en el aparato M-13, al final del primer llenado el máximo desplazamiento fue en el mismo aparato con 25,7 cm. Con fecha base del inicio del primer llenado fue de 2,6 cm en la misma referencia. A la elevación 330 el mayor asentamiento después de la etapa de construcción fue de 25,9 cm en la referencia M-15, al final del primer llenado el desplazamiento fue máximo en la misma referencia con un valor de 31,5 cm. El asentamiento sufrido durante el primer llenado fue de 5,6 cm.



**Fig. IV.10. Asentamientos en Referencias topográficas. Elev. 330.
Fecha base 11-ene-05.**

En la línea a la elevación 386 las mediciones se comenzaron a tomar a partir del 31 de julio de 2006, fecha posterior al primer llenado, por lo que no hay mediciones en la etapa de construcción en esta elevación. Al final del primer llenado el máximo asentamiento fue sobre el eje de la sección L-22 de 10,0 cm.

En la sección L-21 los máximos asentamientos durante la etapa de construcción se midieron en la referencia T-19 ubicada en la parte superior de la línea (elev. 381) su asentamiento al inicio del llenado fue de 65,8 cm. Al final del primer llenado el asentamiento máximo fue en la misma referencia con valor de 76,4 cm, por lo tanto el asentamiento máximo que se midió durante el llenado en el enrocamiento de la sección L-21 fue de 10,6 cm.



**Fig. IV.11. Asentamientos en Referencias topográficas. Sección L-21.
Fecha base 11-jul-06.**

Los asentamientos medidos en las referencias topográficas indican que los mayores asentamientos durante el primer llenado fueron en la zona central del terraplén y hacia las mayores elevaciones.



IV.2.2. Desplazamientos horizontales.

En los inclinómetros se midieron desplazamientos horizontales en dos direcciones: sobre el eje del río y sobre el eje de la cortina.

Los desplazamientos en la dirección eje río, en los inclinómetros que se localizan en la zona del material T (I-1, I-3 e I-5), han sido en el medio superior del terraplén. En los aparatos que se encuentran en el material 3C el máximo desplazamiento se presenta en la parte superior. En la sección L-16 el desplazamiento máximo del inclinómetro I-1 fue 4,7 cm a la elevación. 337, aproximadamente a un 60 % de la altura total del terraplén y en el aparato I-2 el desplazamiento máximo fue de 4,3 cm en la parte superior del terraplén.

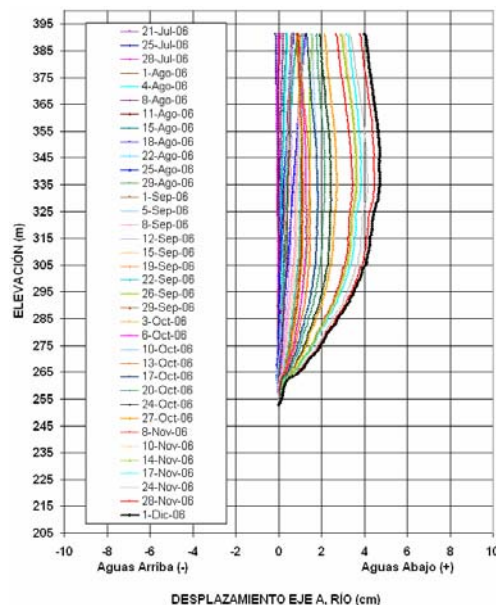


Fig. IV.12. Desplazamientos horizontales. Eje del río. Inclinómetros. I-1.

El valor máximo de desplazamiento en la dirección del río al final del primer llenado fue en la sección L-21 en el inclinómetro I-3 con valor de 5,5 cm a una altura aproximada del 65 % del total del terraplén; en el otro inclinómetro instalado en esta sección (I-4) el desplazamiento máximo fue de 4,9 cm en la parte superior del terraplén.

Los aparatos instalados en la sección L-26 son el I-5 y el I-6, en el primero el máximo desplazamiento fue de 5,3 cm a una altura del 65 % del total del terraplén; en el aparato I-6 el máximo movimiento fue de 4,3 cm en la parte superior del terraplén.

Los movimientos en el eje de la cortina fueron hacia el centro de la cortina, en la sección L-16 se tuvieron movimientos hacia margen derecha y en la sección L-26 hacia margen izquierda; en la sección L-21 los movimientos son pequeños, en todos los inclinómetros los máximos desplazamientos fueron en la parte superior del terraplén. En el inclinómetro I-1 se registro el mayor desplazamiento, fue hacia la margen derecha con valor de 3,0 cm en la parte superior del aparato, en la misma sección se encuentra el aparato I-2 el cual también presentó movimientos hacia la margen derecha con el valor máximo de 1,9 cm en la boquilla del inclinómetro.

En la sección L-21 el máximo desplazamiento fue hacia margen derecha con 1,7 cm, se presentó en la zona superior del inclinómetro I-3, en el aparato I-4 el valor máximo medido fue de 0,3 cm a 70% de la altura total del aparato, con mediciones hasta el 30 de noviembre de 2006.



Hacia la margen derecha se encuentra la sección L-26, en esta los desplazamientos sobre el eje de la cortina fueron hacia la margen izquierda, el mayor movimiento se midió en el inclinómetro I-5, fue de 2,0 cm y se ubicó en la boquilla del aparato; en el aparato I-6 el mayor desplazamiento fue de 1,7 cm localizado en la zona superior del terraplén.

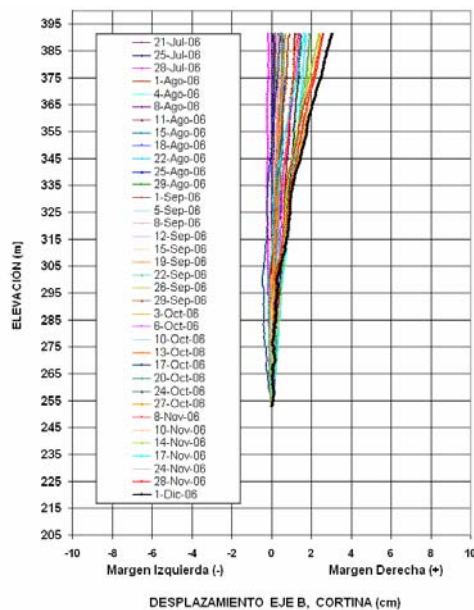


Fig. IV.13. Desplazamientos horizontales. Eje de la cortina. Inclinómetros. I-1.

En las referencias topográficas instaladas en El Cajón, es posible medir los desplazamientos en los ejes del río y de la cortina, en esta sección se consideró como fecha base el inicio del primer llenado.

Los movimientos sobre el eje del río en la elevación 245 fueron hacia aguas abajo, el valor máximo fue de 0,25 cm en la zona central del terraplén. En la elevación 290 los movimientos durante el primer llenado también fueron hacia aguas abajo, el máximo desplazamiento se dio en la referencia más próxima a la margen derecha (M-20) con el valor de 2,4 cm. En la línea ubicada a la elevación 330 los desplazamientos en el eje del río fueron hacia aguas abajo, los máximos desplazamientos se localizaron en la zona central, con el valor máximo de 3,0 cm en la mojonera M-20. En la línea superior, es decir, a la elevación 387 el máximo desplazamiento en el eje del río fue hacia aguas abajo con 3,0 cm; en la mojonera M-22 ubicada al centro del terraplén.

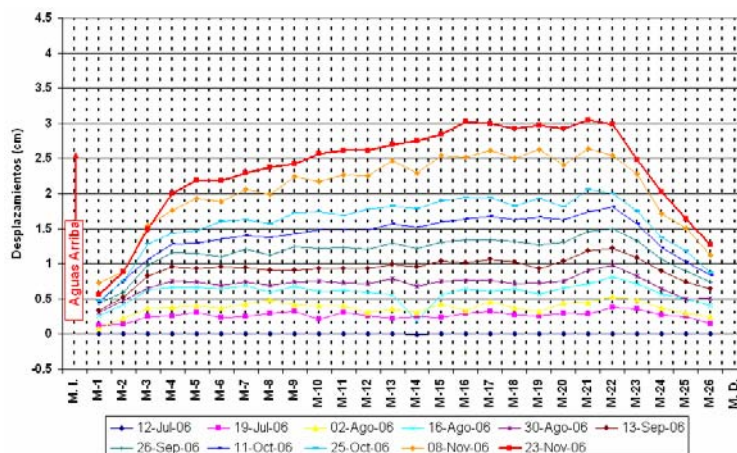


Fig. IV.14. Desplazamientos horizontales. Referencias topográficas. Eje del río. Elev. 330.



En el enrocamiento de la sección L-21 también se tuvieron movimientos hacia aguas abajo, los valores máximos se localizaron en las referencias de mayor elevación únicamente en la T-24 no se sigue con la misma tendencia que las otras referencias. El asentamiento máximo se localizó en la referencia T-19 con 4,1 cm hacia aguas abajo hasta el 22 de noviembre de 2006.

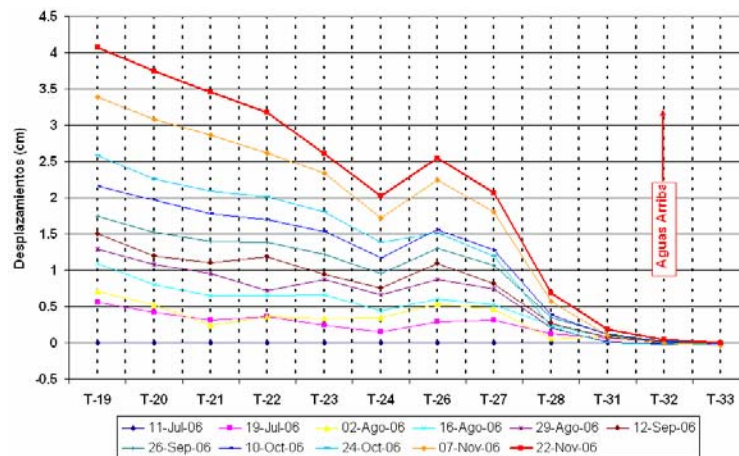


Fig. IV.15. Desplazamientos horizontales. Referencias topográficas. Eje del río. Sección L-21.

En la elevación 245 los desplazamientos en la dirección eje cortina hacia las márgenes son mínimos, para la fecha del 22 de noviembre de 2006 todos los movimientos son hacia margen derecha pero con magnitudes pequeñas; el valor máximo fue de 0,1 cm en la mojonera M-1 ubicada hacia la margen izquierda.

Los movimientos en la línea de la elevación 290 fueron hacia el centro del cauce, los movimientos tuvieron magnitudes pequeñas, el máximo valor fue de 0,5 cm en la referencia M-15 ubicada hacia la margen derecha.

A la elevación 330 los desplazamientos fueron hacia el centro del cauce, el valor máximo fue en la mojonera M-24 ubicada en margen derecha, con 1,0 cm, hacia margen izquierda. En la línea superior (elev. 387) los desplazamientos fueron hacia el centro del terraplén, el movimiento máximo fue de 1,7 cm hacia margen izquierda en la referencia M-34B ubicada en la margen derecha.

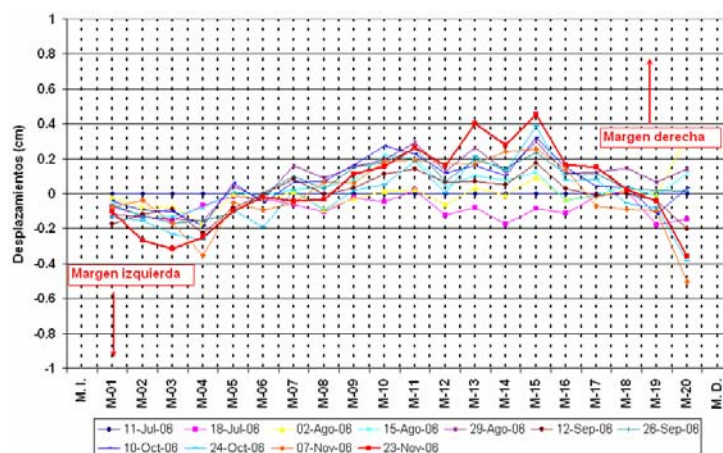


Fig. IV.16. Desplazamientos horizontales. Referencias topográficas. Eje de la cortina. Elev. 290.



En la línea colocada sobre el eje de la sección L-21 los desplazamientos en el eje de la cortina fueron mínimos, el máximo valor fue inferior a 0,4 cm con dirección hacia margen derecha.

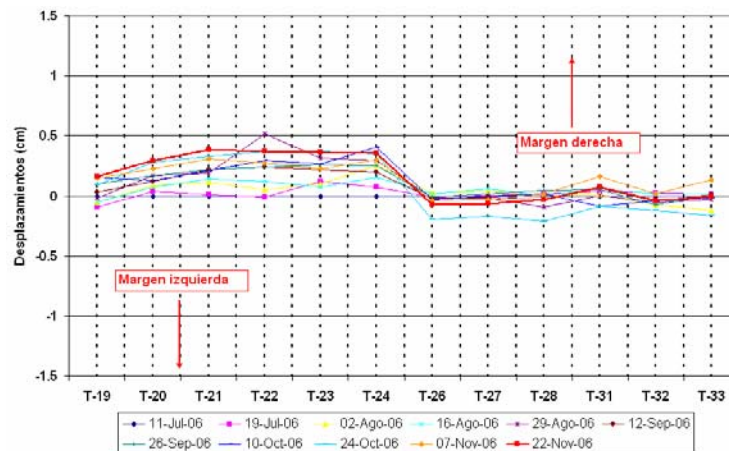
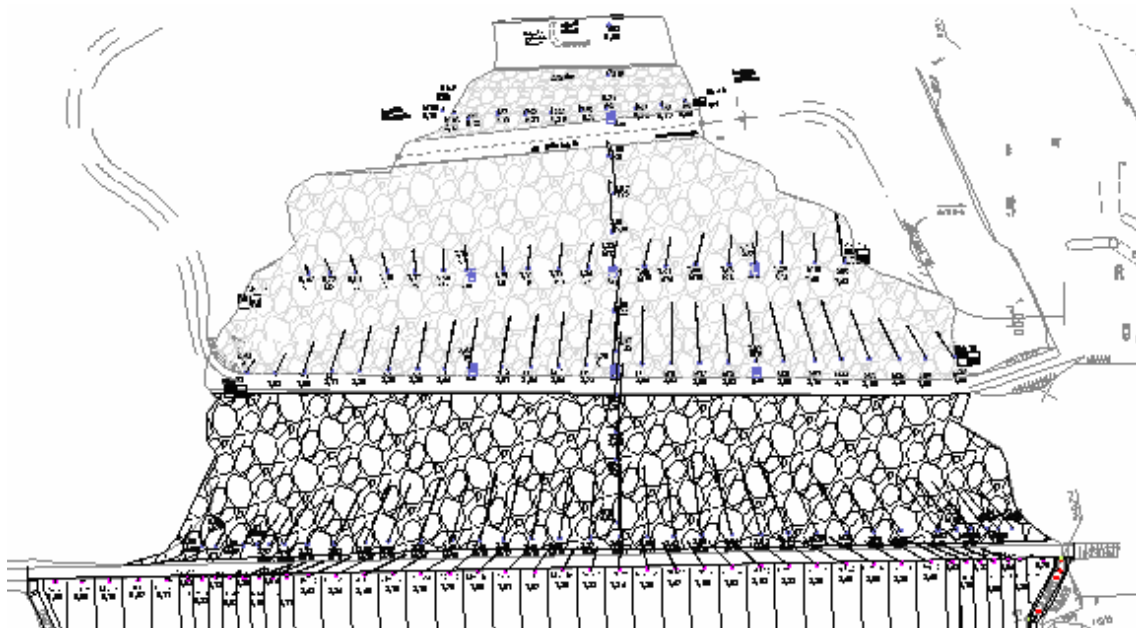


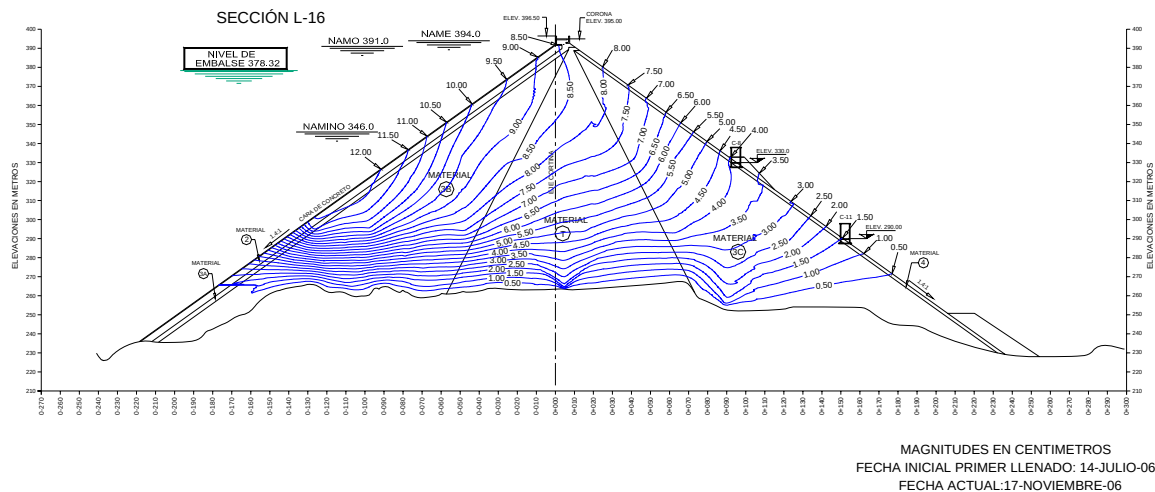
Fig. IV.17. Desplazamientos horizontales. Referencias topográficas. Eje de la cortina. Sección L-21.

En las siguientes figuras se puede apreciar todo lo discutido anteriormente con la ayuda de los vectores de desplazamiento de cada referencia es posible notar la dirección de los desplazamientos del enrocamiento, y con las curvas de igual asentamiento se puede percibir que la zona con mayores asentamientos durante el primer llenado fue el material 3B, y en particular, en el punto de aplicación del empuje resultante de la carga hidráulica.



IV.18. Vectores de desplazamientos en enrocamiento.

Fig.



IV.19. Curvas de igual asentamiento. Sección L-16.

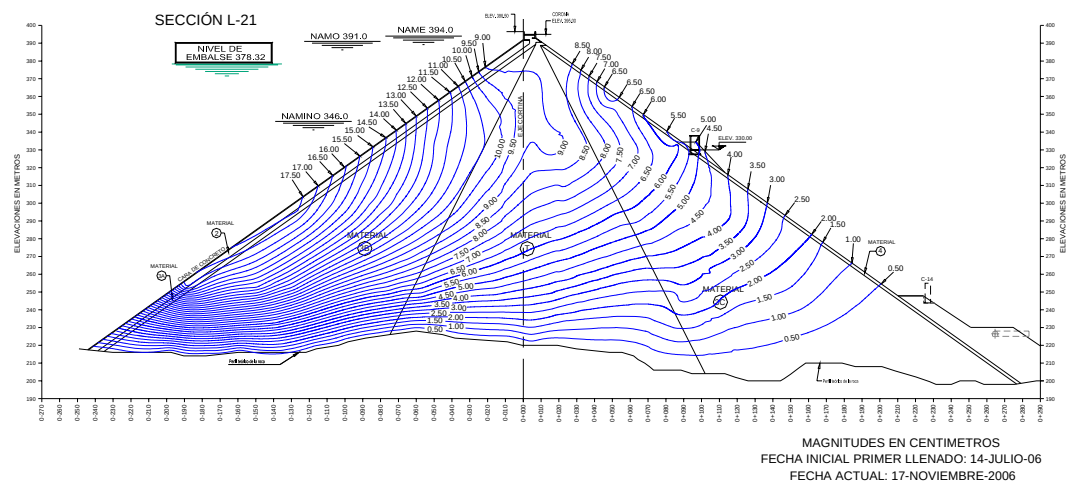


Fig. IV.20. Curvas de igual asentamiento. Sección L-21.

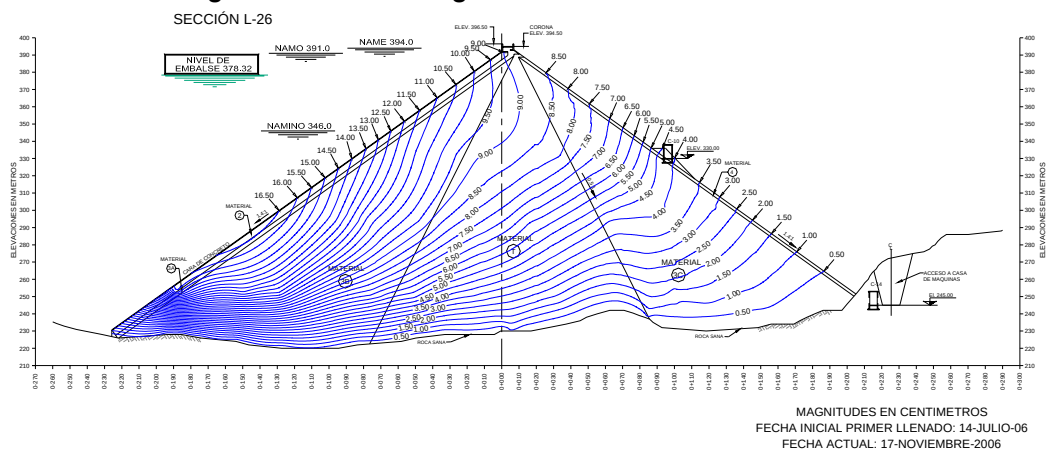


Fig. IV.21. Curvas de igual asentamiento. Sección L-26.

IV.2.3. Módulos de deformación.

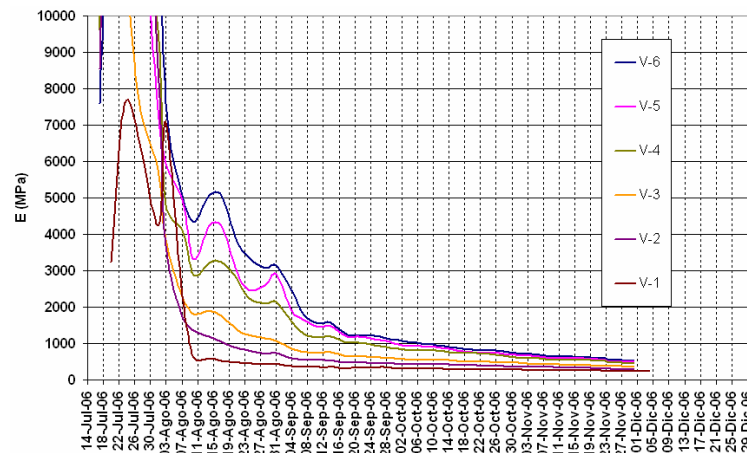
Durante la etapa del primer llenado los instrumentos que se utilizaron para calcular los módulos de deformación fueron: niveles hidráulicos de asentamientos, inclinómetros y grupos de celdas de presión y extensómetros; a continuación se explican los resultados obtenidos del análisis de las mediciones de cada uno de estos instrumentos.



Los módulos de deformación calculados con NHA para la etapa de primer llenado se obtuvieron con las expresiones de Penman y de Fitzpatrick.

El rango de resultados obtenidos a la cota 245 es muy amplio y va desde 160 hasta 660 MPa, los menores valores corresponden a los aparatos instalados cerca de la cara de concreto, los cuales tuvieron los asentamientos mayores en la etapa de llenado y esto provocó a su vez que sus módulos fueran pequeños.

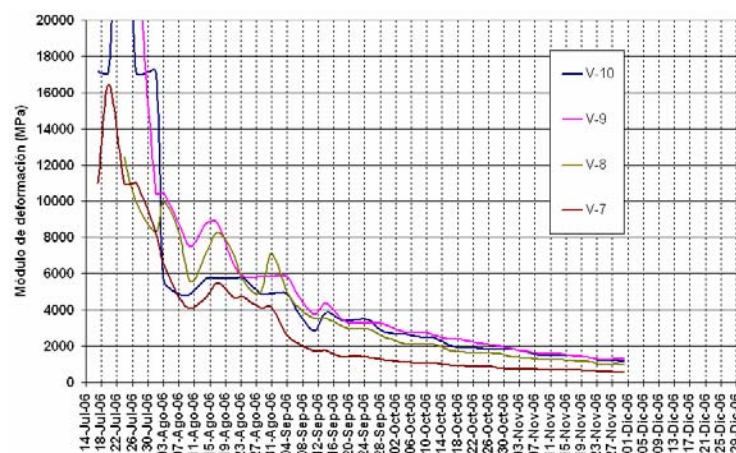
Por otro lado, la dispersión de valores en el material 3B fue debida a que el tiempo del llenado fue muy corto en El Cajón y los módulos de deformación no alcanzaron a estabilizarse en torno a un rango más definido.



**Fig. IV.22. Módulos de deformación (Penman). Material 3B.
Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.**

De modo similar, a la elevación 290 se obtuvo un rango amplio de valores de módulos de deformación para el material 3B que va desde 250 a 700 MPa. Y en la 330 los módulos obtenidos variaron entre 350 y 600 MPa.

Para el material T, en la elevación 245 se repite el fenómeno presentado en el material 3B, los valores obtenidos tienen un rango muy amplio, en este caso que va desde 550 hasta 1 300 MPa. De igual modo, al tener deformaciones pequeñas durante los primeros días de llenado se tuvieron grandes módulos de deformación y también se obtuvieron los menores módulos en los NHA más cercanos a la cara de concreto.



**Fig. IV.23. Módulos de deformación (Penman). Material T.
Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.**



El mismo comportamiento se presentó para los módulos calculados en el material T a la cota 290, en esta ocasión con valores entre 580 y 1 200 MPa. En la elevación 330 los módulos variaron entre 500 y 900 MPa.

En el material 3C los efectos debidos a la acción del primer llenado fueron mínimos y al tener como fecha base el inicio del esta etapa sus deformaciones también fueron pequeñas, lo cual origina que los módulos de deformación fueran altos respecto a los otros materiales.

En la elevación 245 los resultados variaron entre 670 y 1 900 MPa, los cambios posteriores al inicio del primer llenado en este material se pueden atribuir al efecto de la construcción de las capas superiores del terraplén y al asentamiento debido al peso propio del material. En la cota 290 los módulos de deformación resultaron en el rango de 360 a 900 MPa. Para la elevación 330 el comportamiento del material 3C fue similar al de las otras plataformas de instrumentación pero la magnitud de los módulos fue inferior (entre 340 y 600 MPa).

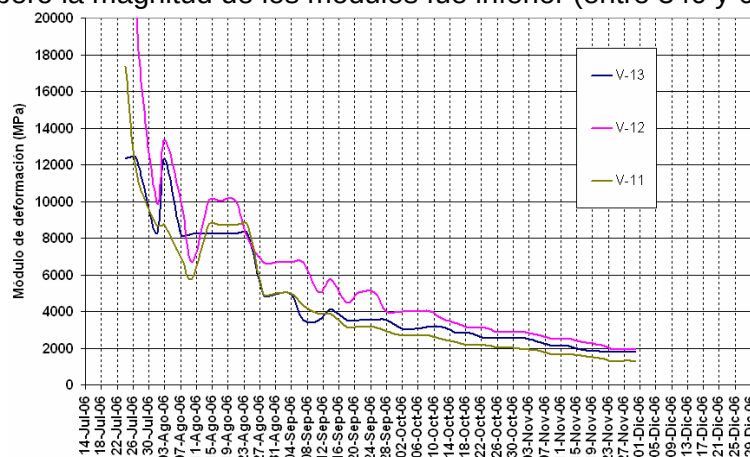


Fig. IV.24. Módulos de deformación (Penman). Material 3C. Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.

Los resultados de los cálculos de los módulos de deformación con la expresión de Penman, demuestran que el material más solicitado por el incremento de la carga hidráulica durante el primer llenado fue el 3B, mientras el material 3C no se ve afectado por la carga hidráulica durante el llenado.

En la siguiente tabla se resumen los valores promedios de los módulos de deformación obtenidos con la fórmula de Penman para cada valor, obsérvese que aunque algunos módulos calculados a partir de mediciones en el material 3C resultaron ser muy grandes en promedio fueron menores a los obtenidos para el material T, debido a que éste último es menos deformable que el material 3C.

Tabla. IV.8. Módulos de deformación promedio (Penman).

Material	3B	T	3C
Módulo de deformación promedio (MPa)	412,8	844,3	799,2

El menor valor de los módulos de deformación resultó ser en el material 3B, como se mencionó antes ésta fue la zona más afectada por la carga hidráulica del embalse y sus módulos son un reflejo de los asentamientos sufridos durante esta etapa.

Con la expresión de Fitzpatrick el cálculo de los módulos para el material 3B dio que el valor osciló entre 200 y 260 MPa. En la sección L-21 se tienen menores módulos en los aparatos más alejados a la cara de concreto, mientras en la sección L-26 son los más cercanos a la cara los de menor magnitud. Esta diferencia está influenciada por la geometría de cada sección y la carga hidráulica a la que cada aparato está sujeto.



En la elevación 290 la dispersión de los módulos de deformación fue mayor, resultó entre 70 y 320 MPa. Y en la cota 330 los módulos de deformación calculados fueron entre 140 y 400 MPa, en este caso si se observó que los menores valores resultaron en los aparatos más alejados a la cara de concreto, fenómeno asociado a que la carga hidráulica que actúa sobre estos aparatos es menor.

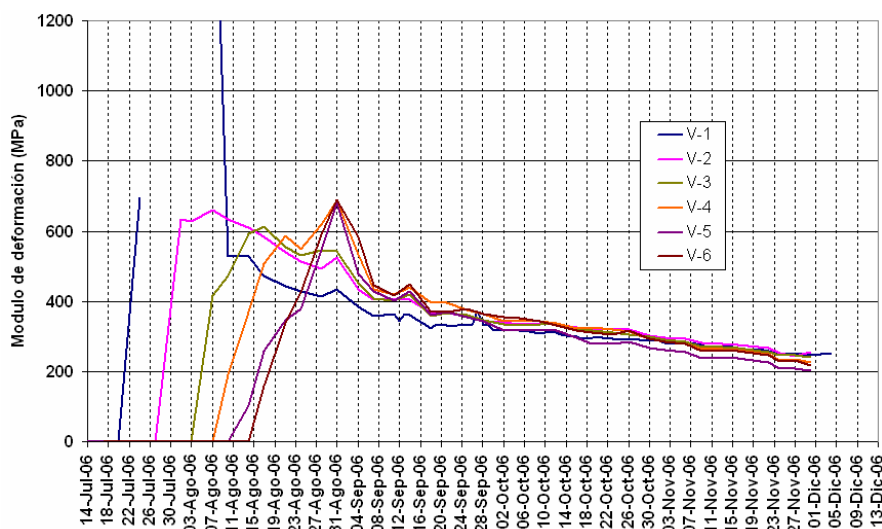


Fig. IV.25. Módulos de deformación (Fitzpatrick). Material 3B.
Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.

En el material T, las elevaciones de las proyecciones de los NHA son mayores que para el material 3B por lo que se registraron valores de módulos de deformación a partir de fechas posteriores que en el material 3B; al final del primer llenado no se logró notar un rango constante sobre el cual se estabilicen los aparatos instalados en esta zona como sucedió en el material 3B.

Para la elevación 245 los valores obtenidos para casi todos los aparatos fue entre 75 y 225 MPa, exceptuando únicamente el instrumento V-10 debido a que solo llevaba una semana de registros de módulos de deformación al final del llenado, y no se considera representativo.

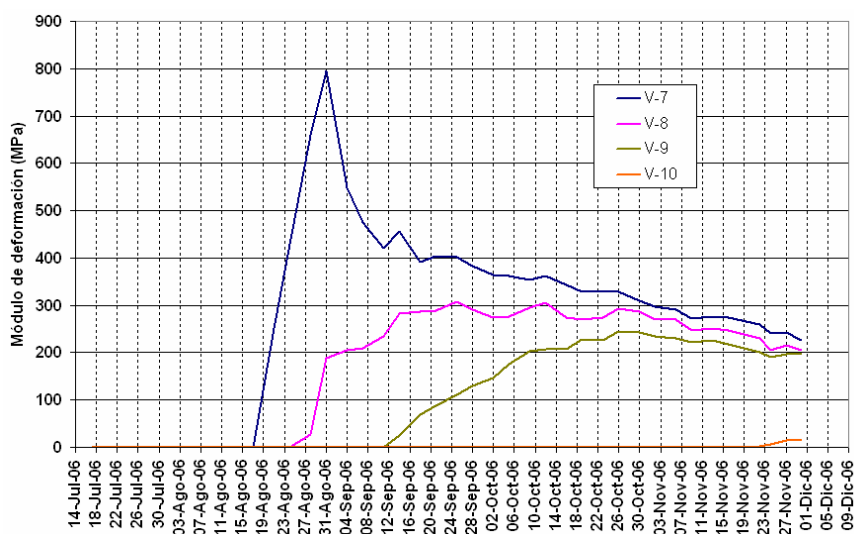


Fig. IV.26. Módulos de deformación (Fitzpatrick). Material T.
Sección L-21. Elev. 245 m.s.n.m.



En la cota 290 los valores calculados de módulos de deformación para el material T con la expresión propuesta por Fitzpatrick variaron entre 70 y 240 MPa, los valores máximos coincidieron con los aparatos instalados hacia aguas arriba.

Los aparatos considerados para calcular los módulos de deformación a la elevación 330 en el material T, fueron sólo uno por sección debido a que los demás instrumentos aún no tenían el tiempo suficiente bajo la acción del embalse para considerarse representativos de la zona, los módulos obtenidos resultaron entre 110 y 140 MPa.

Los módulos obtenidos con la expresión de Fitzpatrick muestran que las mayores magnitudes y por lo tanto menores deformabilidades se presentaron en el material 3B durante el llenado, por otro lado el material T resultó ser más deformable si se considera que sus módulos fueron los menores y, el material 3C no se encontró bajo el efecto del embalse durante el primer llenado. Al analizar estos resultados se debe tener en mente que los materiales que componen la cortina se encontraron con diferentes estados de esfuerzos y por lo tanto no es correcto comparar su deformabilidad con los resultados obtenidos con la expresión de Fitzpatrick.

Como se mencionó anteriormente los inclinómetros instalados en el terraplén de la presa El Cajón fueron colocados sobre los materiales T y 3B, por lo que los módulos calculados con dichos instrumentos solo se realizaron para dichos materiales.

El comportamiento de ambos materiales fue similar al mostrado en los NHA (calculados con la expresión de Penman), es decir, las primeras fechas tienen valores muy grandes debido a la poca deformación acumulada hasta esos días, y al final del llenado se tienen valores que tienden a un rango constante. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

El comportamiento en los aparatos I-3 e I-5 es prácticamente el mismo, esto es debido a que ambos están instalados en secciones centrales del terraplén (L-21 y L-26 respectivamente) y cuyo comportamiento fue muy similar durante el llenado. Los módulos calculados al final del primer llenado en el material T resultaron entre 1 150 y 1 550 MPa, los valores mayores corresponden a las secciones L-21 y L-26 debido a que la altura del terraplén es mayor en esta zona.

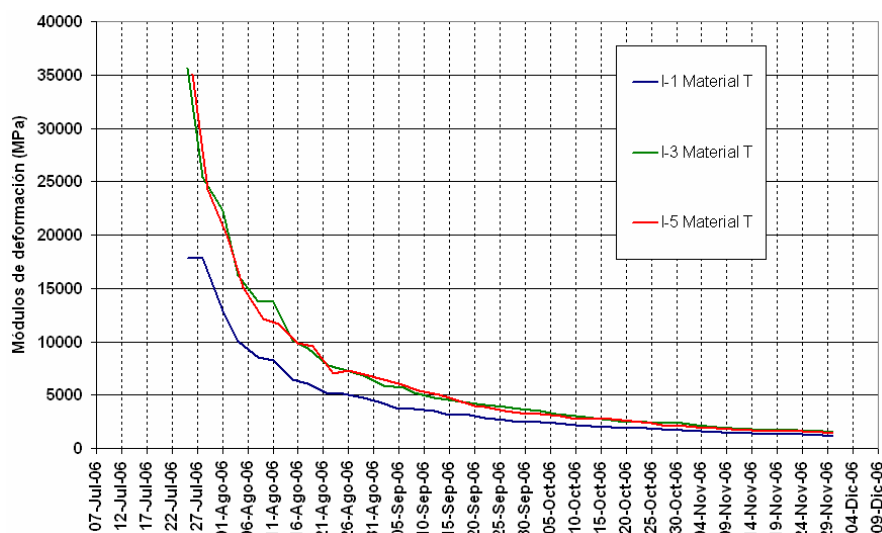


Fig. IV.27. Módulos de deformación con inclinómetros. Material T.

En el material 3C se observó un comportamiento similar que en el material T, los mayores módulos se asocian a las secciones L-21 y L-26 (donde el terraplén es de mayor altura). Los valores calculados al final del primer llenado resultaron entre 900 y 1 370 MPa. El material 3C tuvo valores menores al material T lo cual demuestra que este último es menos



deformable, por otro lado, si recordamos los resultados obtenidos durante el llenado de Aguamilpa la diferencia entre los módulos de deformación del material T y 3C es mucho menor en El Cajón.

Lo anterior comprueba una de los objetivos del diseño: tratar de que las deformaciones en el terraplén fueran más uniformes para evitar agrietamientos en la cara de concreto debido a una deformada con doble curvatura en esta.

A continuación se resumirán los resultados obtenidos del análisis anterior para los grupos instalados en la cortina de El Cajón durante la etapa del primer llenado.

Recordando que el análisis en este periodo se tomo a partir de la fecha en que los aparatos se encuentran bajo el efecto de la carga debida al embalse; es preciso mencionar cuales fueron las fechas consideradas en los cálculos.

Tabla. IV.9. Periodo en la cual los grupos estuvieron bajo la carga del embalse.

Grupo	Elevación de la intersección de la recta normal y la cara de concreto (msnm)	Elevación de los aparatos (msnm)	Cadenamiento respecto a la corona (m)	Material	Periodo bajo el efecto del embalse
1	305,23	247.04	80 hacia aguas arriba	3B	10/ago/06 a 28/nov/06
2	333,48	246.70	20 hacia aguas arriba	T	27/ago/06 a 28/nov/06

En el grupo 1, instalado en material 3B, el comportamiento durante el primer llenado es aproximado al de una recta tanto para esfuerzos normales como para esfuerzos cortantes. Es posible percibir que para las menores deformaciones la pendiente es mayor, dichos valores corresponden a los primeros valores tomados en cuenta para la etapa del primer llenado hasta mediados de septiembre en donde se comienza a comportar como una recta con una pendiente definida y constante hasta el final del llenado. Tomando en cuenta lo anterior se llegó al resultado final de módulos de deformación E 63,30 MPa.

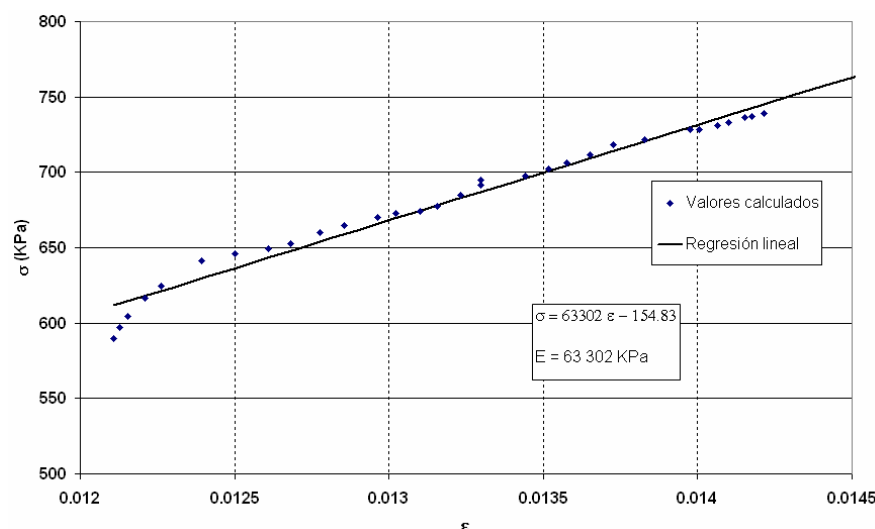


Fig. IV.28. Módulos de deformación E en el grupo G-1.

En el grupo 2, instalado en el material T, los resultados obtenidos para la etapa de construcción mostraban que el comportamiento del terraplén en esta zona podría asociarse al fenómeno de arqueado mencionado anteriormente. Durante el primer llenado los resultados obtenidos para esfuerzos y deformaciones normales se asemejan al comportamiento de una recta, sin embargo para el análisis del esfuerzo cortante y deformación angular se siguen teniendo comportamientos que sugieren que se siguió desarrollando el arqueado en este



periodo. Los módulos de deformación fueron de 49,77 MPa, dado que el fenómeno de arqueamiento influye directamente en el estado de esfuerzos de esta zona del terraplén los resultados obtenidos no son representativos para comparar los materiales.

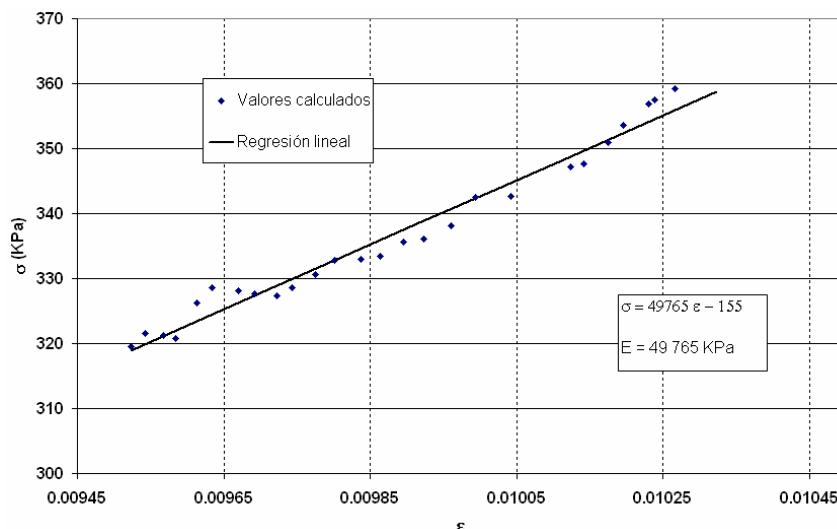


Fig. IV.29. Módulos de deformación E en el grupo G-2.

No obstante lo anterior, si es posible notar que el módulo de deformación es mayor para el material 3B que para el material T.

IV.3. Niveles de agua en la presa.

En capítulos anteriores se mencionó que los niveles de agua dentro del terraplén se midieron con 10 piezómetros eléctricos y con los tubos de los seis inclinómetros. En esta sección no se profundizará acerca de la instalación y ubicación de dichos aparatos.

En las gráficas que se muestran a continuación las fechas corresponden únicamente al 2006 ya que sólo se hablará de la etapa del primer llenado.

IV.3.1. Niveles piezométricos.

El piezómetro PZE-1 tuvo pocas variaciones durante el primer llenado, se mantuvo constante a la elevación 234 hasta finales de agosto de 2006, cuando comenzó a subir el nivel debido al embalse, aunque dicho cambio fue de sólo un metro todas las mediciones fueron por debajo del nivel de la roca.

El aparato PZE-2 tuvo un comportamiento constante a la elevación 236, correspondiente al nivel de la roca, en las mediciones no se manifiesta un cambio debido a la carga del embalse.

El inclinómetro I-1 ubicado en el eje de la cortina muestra también un comportamiento constante, en este caso a la cota 258, en este inclinómetro la roca se encuentra a la elevación. 264.

El inclinómetro I-2 ubicado hacia aguas abajo si registró niveles superiores al de la roca, su comportamiento presenta varios picos que corresponden a las lluvias registradas durante agosto y septiembre, posteriormente el nivel disminuye hasta la cota 248.

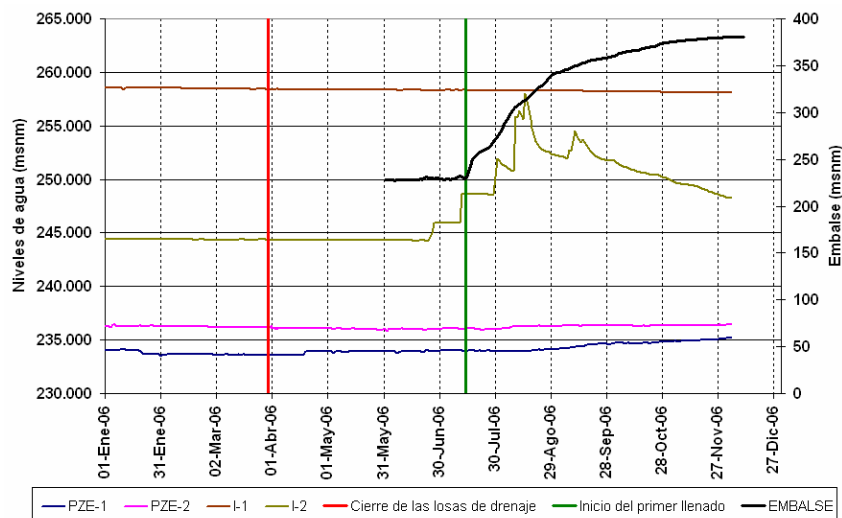


Fig. IV.30. Niveles de agua. Sección L-16.

El piezómetro PZE-3 muestra en sus mediciones que los niveles de agua dentro del terraplén, atrás de la losa de concreto se comportaron de modo similar al embalse, la cota inicial fue la 224, en la figura siguiente se observa claramente que el nivel del PZE-3 y el del embalse tuvieron el mismo comportamiento con la cota final a la 234, diez metros más que el inicio del primer llenado.

El aparato PZE-4 no muestra un cambio tan marcado como el PZE-3 pero si tuvo un incremento debido al embalse, su nivel inicial fue a la elevación 230 y su incremento fue inferior a 1,5 m durante el primer llenado.

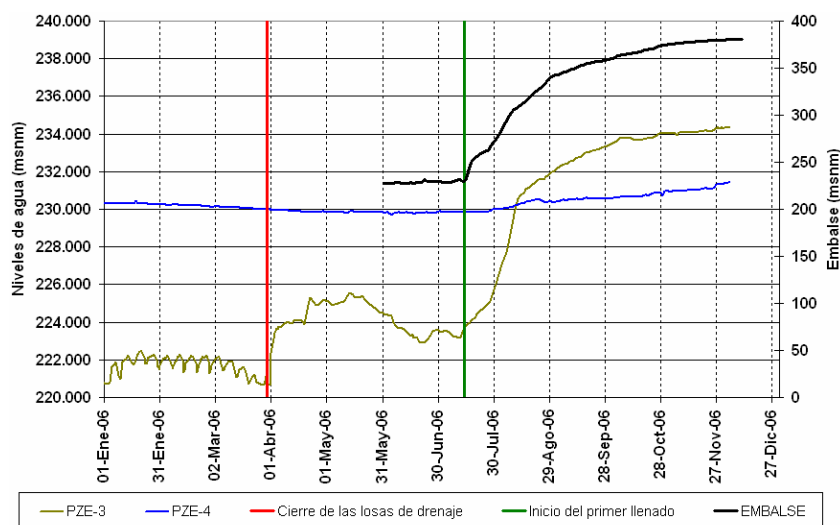


Fig. IV.31. Niveles de agua. Sección L-18.

La sección 21 por estar ubicada sobre el cauce natural del río representa la salida del agua dentro del terraplén, por esto todos los aparatos instalados tuvieron lecturas que muestran una tendencia de comportamiento del agua dentro de la presa similar al del embalse.

En el piezómetro PZE-5 se midieron niveles iniciales a la cota 224 y finales a la 233. En el aparato PZE-6 la elevación inicial fue a la 225 y la final a la 231.

El inclinómetro I-3 registró en los primeros días un descenso del nivel de medio metro a partir de la cota 226, posteriormente comenzó a reflejar el efecto del primer llenado llegando



hasta la elev. 230, el día 15 de agosto midió un pico a la cota 230 correspondiente a la lluvia más intensa durante el llenado.

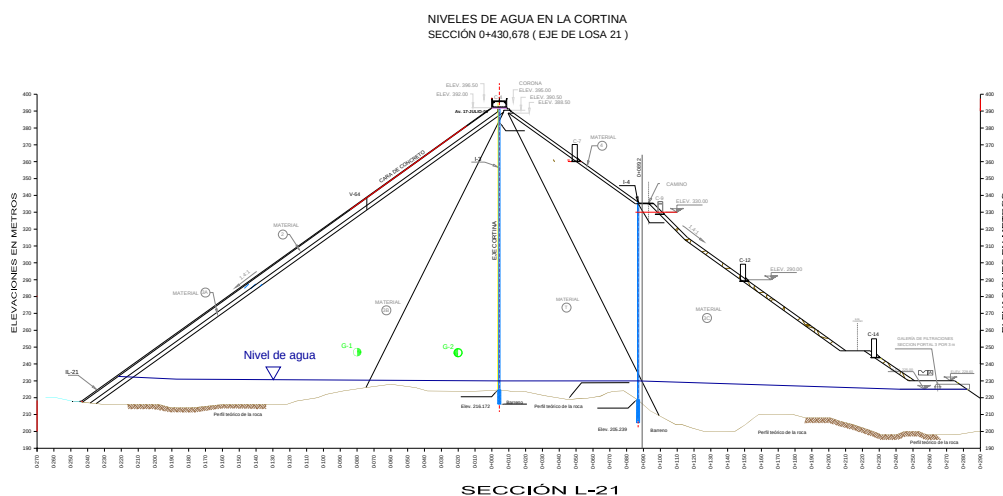


Fig. IV.32. Niveles de agua. Sección L-21.

El tubo del inclinómetro I-4 también midió un decremento en el nivel durante los primeros días, con valor menor a medio metro, su cota inicial fue la 223 y al final del primer llenado llegó a la 228.

Los cambios del nivel debidos al efecto del primer llenado se registraron primero en los aparatos instalados hacia aguas arriba, también fueron estos los que midieron mayor incremento por dicho efecto; en esta sección todos los niveles de agua medidos son por encima del nivel de la roca.

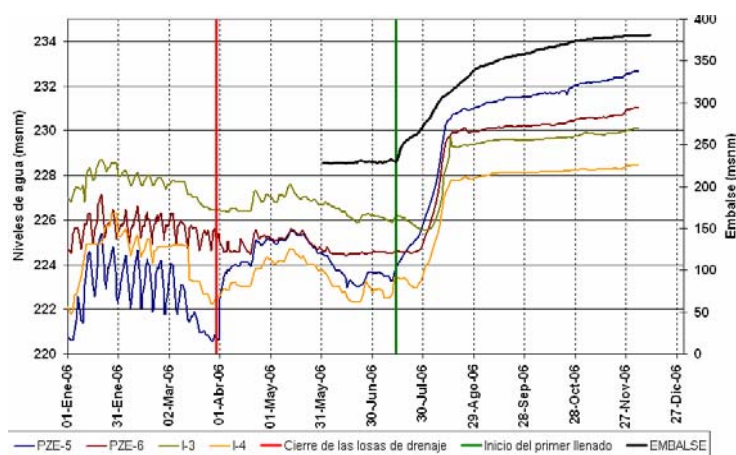


Fig. IV.33. Niveles de agua. Sección L-21.

En la sección L-23 los dos piezómetros instalados se colocaron en zonas cercanas a la cara de concreto, ambos mostraron incrementos en el nivel de agua debido a la carga del embalse.

El PZE-7 midió el nivel del agua a la cota 217 al inicio del primer llenado y al final de este periodo a la elev. 230, esta última fue alcanzada desde mediados de septiembre después de esta fecha su comportamiento fue constante.



El PZE-8 tuvo valores iniciales a la elevación 223, incrementó su nivel a la cota 230 a mediados de agosto, tuvo un periodo de incrementos mínimos manteniendo la misma cota (330) hasta finales de octubre cuando cambia su tendencia y llega finalmente al nivel 231 al final del primer llenado.

Los piezómetros colocados en esta sección marcaron niveles por arriba del de la roca.

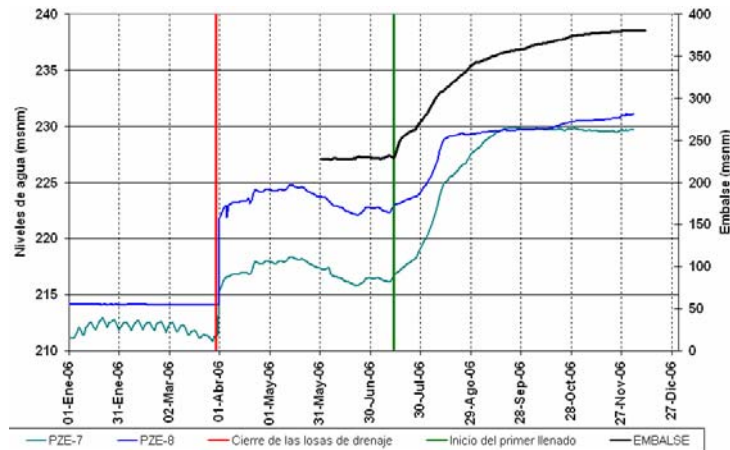


Fig. IV.34. Niveles de agua. Sección L-23.

En la sección L-26, el piezómetro PZE-9 midió el nivel del agua a la cota inicial de 224 m, registró incrementos en el nivel desde el inicio del primer llenado llegando a la elevación 230 para mediados de agosto cuando cambia la velocidad de los incrementos más lentos hasta el final del primer llenado que llega a la cota 231.

El PZE-10 inicialmente tuvo un nivel constante a la cota 227 hasta principios de agosto cuando tuvo un incremento súbito a la elevación. 230 en un lapso dos semanas, después de esta fecha su comportamiento es muy similar al del PZE-9 llegando también a la elevación. 231 al final del primer llenado.

El aparato I-5 tuvo un comportamiento constante, su nivel se mantuvo a la cota 235, sólo decreció 0,3 m durante el llenado.

El I-6 mostró comportamiento similar al I-5 pero presentó un brinco el 15 de agosto de 0,5 m (día de la lluvia más intensa), aún así su nivel se mantiene dentro del rango de la cota 235 durante todo el periodo del llenado.

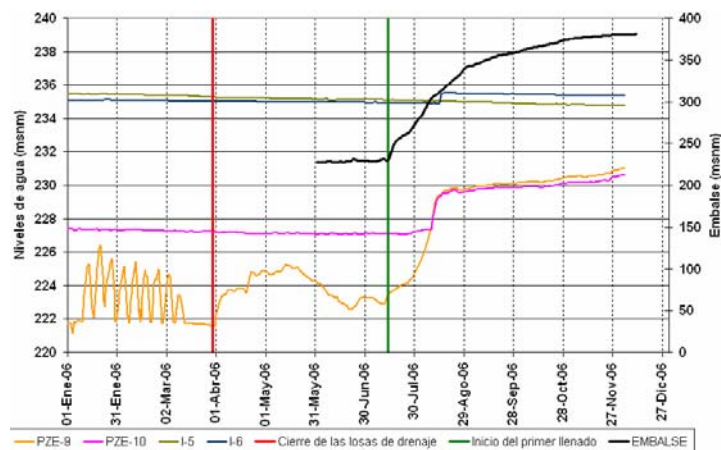


Fig. IV.35. Niveles de agua. Sección L-26



En las secciones que se ubican hacia las laderas los inclinómetros no muestran incremento notable del nivel de agua debido al primer llenado, los únicos piezómetros instalados que registraron cambios fueron los que se encuentran cercanos a la cara de concreto debido a que el aumento en los niveles de esta zona es mayor que cualquier otra parte del terraplén.

En la sección L-21 todos los aparatos registraron que los niveles de agua seguían la misma tendencia que el embalse, debido a que dicha sección está ubicada sobre el cauce natural del río y en ella se encuentra la galería de filtraciones del terraplén por lo que esta sección constituye el dren del agua dentro del terraplén.

IV.3.2. Filtraciones en la cortina.

Sobre la sección L-21 al pie del respaldo aguas abajo se construyó una galería con la finalidad de captar y aforar las filtraciones del terraplén.

Las filtraciones fueron incrementándose a lo largo del primer llenado conforme aumentó la carga hidráulica del embalse, hasta la fecha considerada para esta tesis (4 de diciembre de 2006) el máximo gasto registrado fue de 87,3 L/s al final del periodo por lo que es de esperarse que este gasto aumente en caso de que el embalse también lo haga.

Los primeros picos medidos en las filtraciones se pueden asociar a las lluvias más intensas como se muestra en la figura, posteriormente las filtraciones tienen lapsos entre comportamientos constantes y cambios súbitos en el gasto.

El primer cambio fue entre el 1 y el 8 de septiembre de 32 a 47 L/s, se asoció a que días antes el embalse rebasó la cota 330, a la cual se encuentra una junta constructiva que divide la primer y segunda etapa de colado de la cara de concreto.

El segundo incremento fue de 47 a 59 L/s entre el 20 y el 26 de octubre y se asoció a que el embalse rebasó la elevación 380 a la que se localiza la junta constructiva entre la segunda y tercer etapa de colado.

Después de esta fecha el gasto aumentó hasta 63 L/s, el 25 de noviembre día que comenzó otro incremento súbito hasta el máximo reportado al 4 de diciembre con el valor de 87,3 L/s, este cambio se asocio al nivel de la tercer etapa de colado.

Aunque se han tratado de explicar los incrementos del gasto de las filtraciones con el hecho de que el embalse va rebasando las juntas constructivas, aún no existe suficiente evidencia para poder afirmarlo.

El gasto máximo medido hasta ahora ha resultado bajo si se compara con las filtraciones de otras presas y considerando que El Cajón es una presa grande.

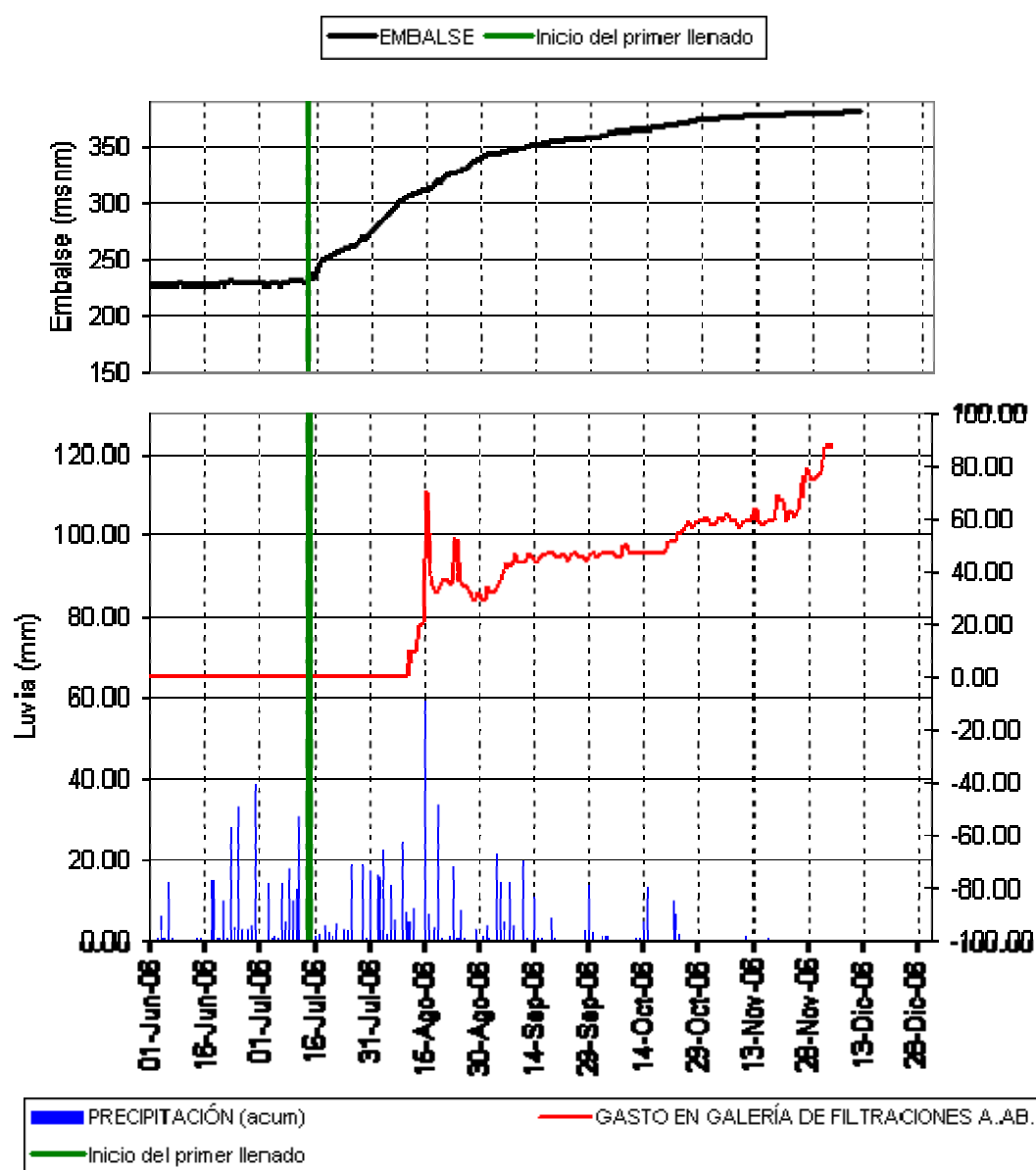


Fig. IV.36. Filtraciones en la cortina.

IV.4. Deformaciones en la cara de concreto.

Para medir las deformaciones en la cara de concreto durante el primer llenado se utilizaron los siguientes aparatos: referencias topográficas, extensómetros tridimensionales, extensómetros bidireccionales, extensómetros unidireccionales, medidores de juntas mecánicas, inclinómetros inclinados y celdas eléctricas de asentamientos.



IV.4.1. Deformaciones medidas en referencias topográficas.

Durante la etapa del primer llenado se midieron, en la cara de concreto, asentamientos y desplazamientos a la elevación 391, y en parapeto, tanto aguas arriba como aguas abajo. En la elevación 391 el máximo asentamiento medido al 1 de diciembre de 2006 fue de 10,5 cm en la sección L-24.

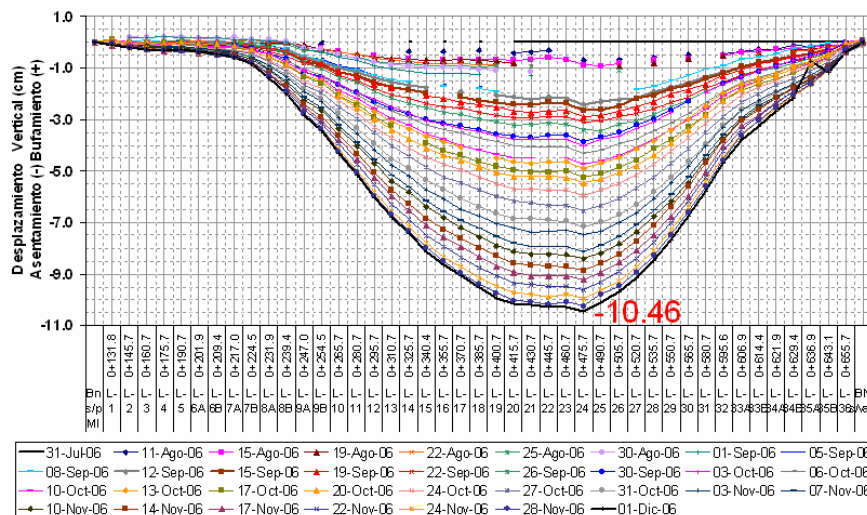


Fig. IV.37. Asentamientos en la cara de concreto. Referencias topográficas. Elev. 391.

IV.4.2. Desplazamientos horizontales.

Con las referencias topográficas también se midieron los desplazamientos horizontales a las elevación 391 y en el parapeto.

Los desplazamientos en el eje del río a la elevación 391 fueron hacia aguas abajo, el máximo desplazamiento se registró en la referencia L-391-28 con el valor de 1,4 cm. Los mayores movimientos se midieron en la zona de la margen derecha.

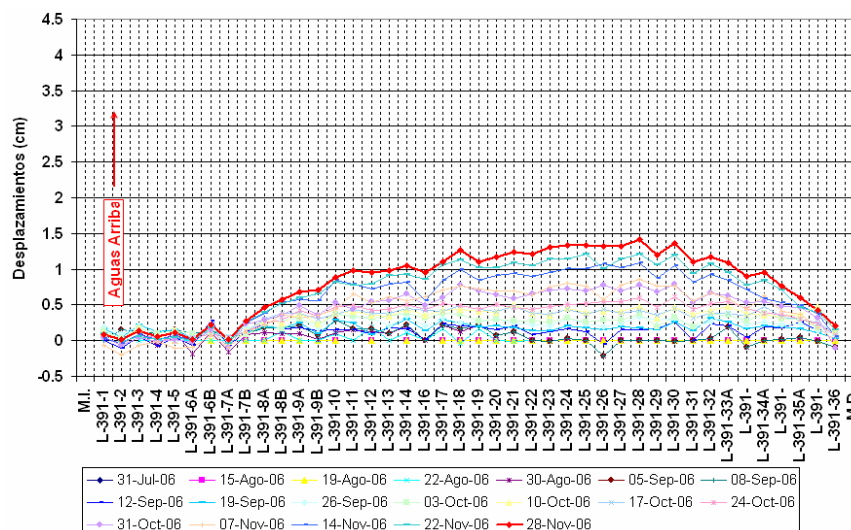


Fig. IV.38. Desplazamientos en la cara de concreto. Referencias topográficas. Eje del río. Elev. 391.

En la línea instalada aguas arriba en el parapeto se midieron en margen izquierda desplazamientos hacia aguas arriba con valor máximo de 0,3 cm en la referencia LAAR-4,



en las referencias centrales y en margen derecha se desplazaron hacia aguas abajo con el máximo de 0,5 cm en la referencia LAAR-28.

En el parapeto aguas abajo los desplazamientos en el eje del río tuvieron el mismo comportamiento que en la línea instalada sobre el parapeto (aguas abajo), hacia aguas arriba el máximo desplazamiento fue de 0,24 cm en la referencia LAAB-2 mientras que el mayor movimiento hacia aguas abajo fue de 0,27 cm en la losa L-31.

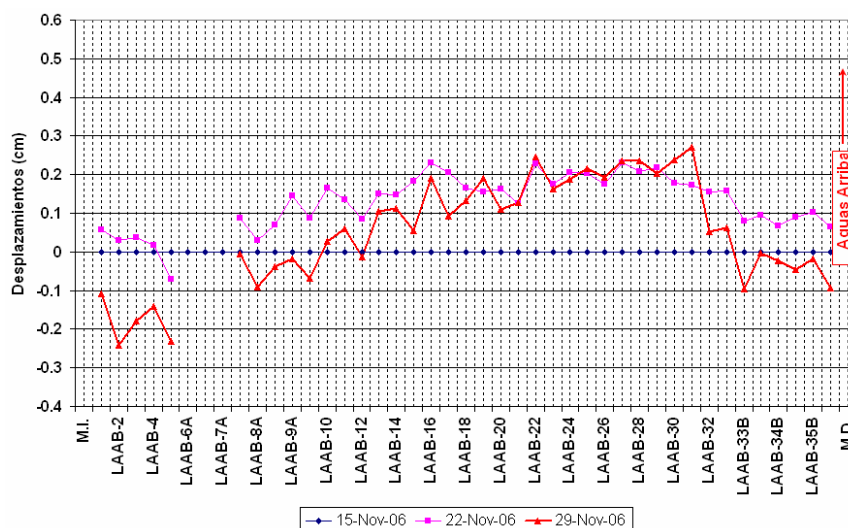


Fig. IV.39. Desplazamientos en la cara de concreto. Referencias topográficas. Eje del río. Parapeto aguas abajo.

Los desplazamientos en la elevación 391 se desarrollan hacia aguas abajo, y en mayor magnitud en la margen derecha, en el parapeto se midieron desplazamientos hacia aguas arriba en la margen izquierda.

Los desplazamientos sobre el eje de la cortina en la elevación 391 son hacia el centro del cauce, los máximos movimientos fueron de 2,3 cm en las referencias L-391-10 (ubicada de lado izquierdo) hacia margen derecha y L-391-30 (ubicada de lado derecho) hacia margen izquierda.

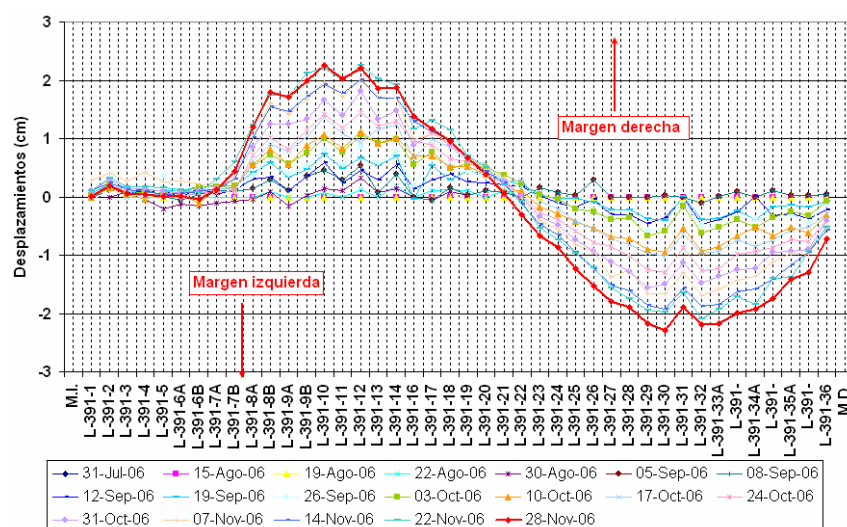


Fig. IV.39. Desplazamientos en la cara de concreto. Referencias topográficas. Eje de la cortina. Elev. 391.

En la línea del parapeto aguas arriba se utilizó la fecha base del 9 de noviembre, para la medición reportada al 29 de noviembre de 2006 los movimientos son hacia el centro de la



cortina; los máximos desplazamientos se dieron en las referencias LAAR-9A y LAAR-32, ambos de 0,76 cm y hacia la zona central.

Los desplazamientos horizontales en el parapeto aguas abajo también fueron hacia la zona central de la cortina, el máximo movimiento fue de 0,4 cm en la referencia LAAB-33B hacia margen derecha.

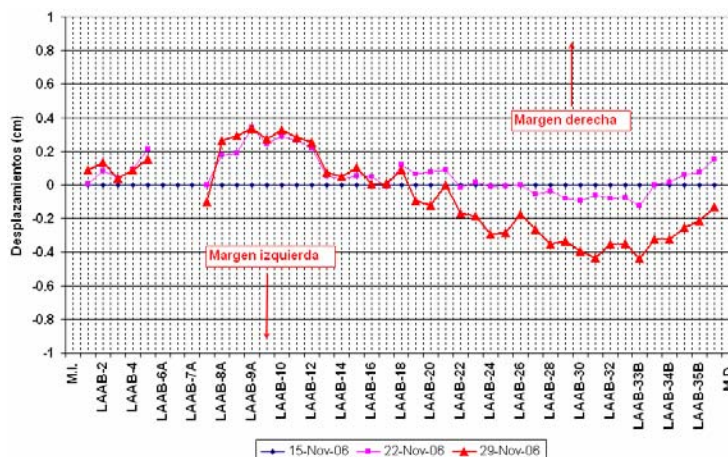


Fig. IV.40. Desplazamientos en la cara de concreto. Referencias topográficas. Eje de la cortina. Parapeto aguas abajo.

En la cara de concreto los desplazamientos medidos en las referencias topográficas durante la etapa del primer llenado sobre el eje de la cortina fueron hacia el centro del cauce.

IV.4.3. Desplazamientos en juntas losa-plinto.

Los extensómetros tridimensionales fueron colocados en la junta plinto-losa, algunos aparatos ya habían sido instalados en la etapa de construcción mientras que los de elevaciones superiores se instalaron en fechas posteriores al inicio del primer llenado.

La mayor parte de los aparatos indicaron apertura entre la losa y el plinto, los desplazamientos máximos se midieron hacia la margen derecha teniendo el mayor movimiento en la losa L-12 con 7,7 mm. En la losa L-21 se llegó al máximo de 2,4 mm de apertura para el 29 de agosto de 2006, a partir de esta fecha cambió su tendencia hacia el cierre llegando a 1,6 mm al día 4 de diciembre.

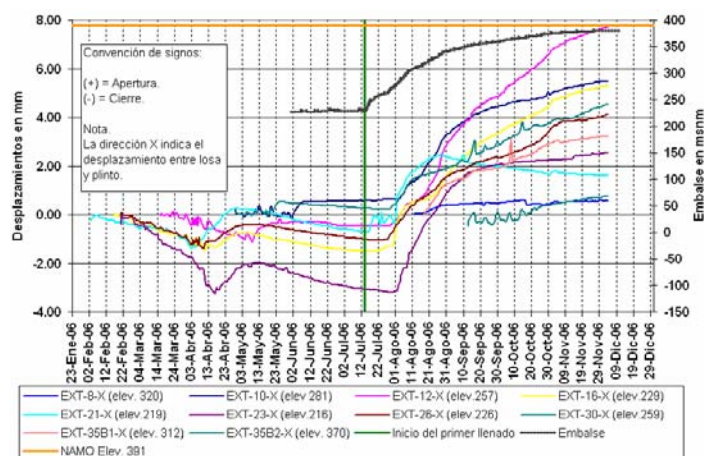


Fig. IV.41. Movimientos de apertura o cierre de la junta losa-plinto (Dirección X). Extensómetros tridimensionales.



Tomando como fecha base el inicio del primer llenado el máximo desplazamiento también es de apertura en la losa L-12 con 8,2 mm.

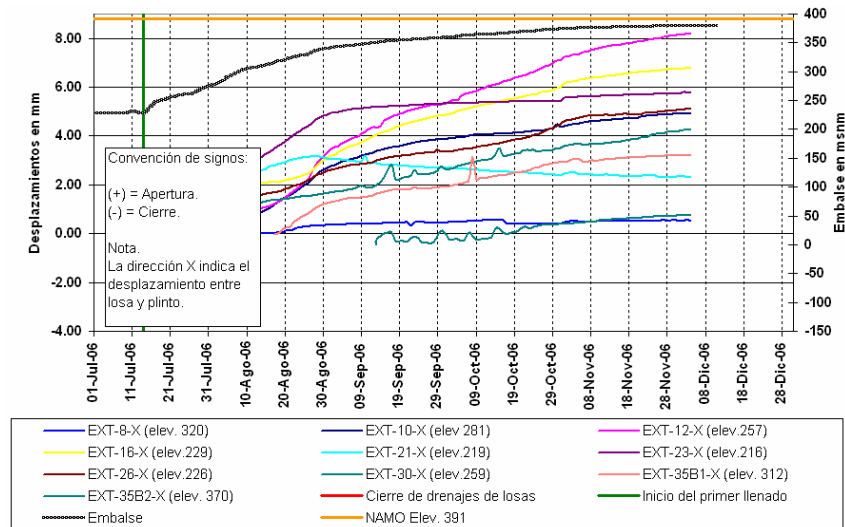


Fig. IV.42. Movimientos de apertura o cierre de la junta losa-plinto (Dirección X). Extensómetros tridimensionales. Fecha base del primer llenado.

En la dirección Y, los aparatos instalados en la margen izquierda mostraron inicialmente una tendencia de desplazamiento hacia el centro del cauce, a finales de agosto esto cambia y comienza a desplazarse hacia la margen izquierda. En margen derecha la tendencia fue hacia el centro del cauce para los aparatos instalados a menores elevaciones para los demás aparatos el desplazamiento fue mínimo. Al centro del cauce los movimientos son mínimos. El máximo desplazamiento medido al 4 de diciembre de 2006 fue en la losa L-26 de 3,7 mm hacia el centro del cauce.

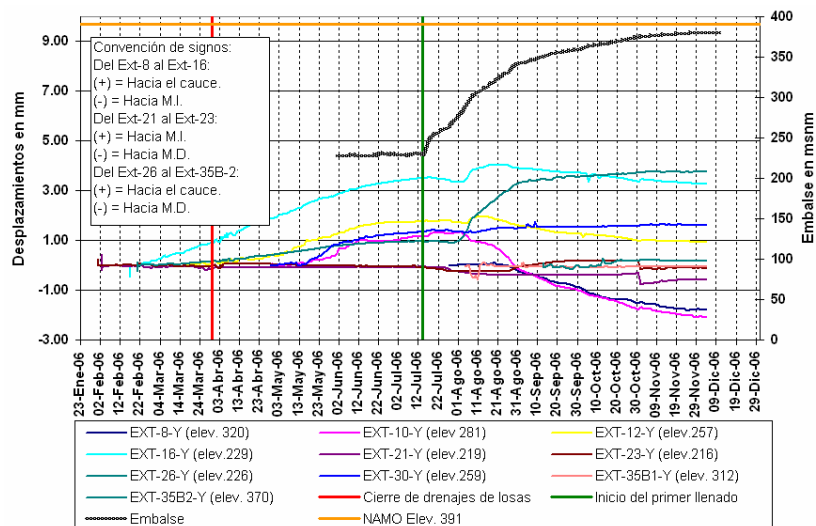


Fig. IV.43. Movimientos perpendiculares al cauce (Dirección Y). Extensómetros tridimensionales.

Los desplazamientos medidos a partir del inicio del primer llenado fueron pequeños, los máximos desplazamientos se registraron en la losa L-26 con 2,8 mm hacia el cauce y en la losa L-10 de 3,3 mm hacia la margen izquierda.



Deformaciones de la cortina del P. H. El Cajón durante el primer llenado

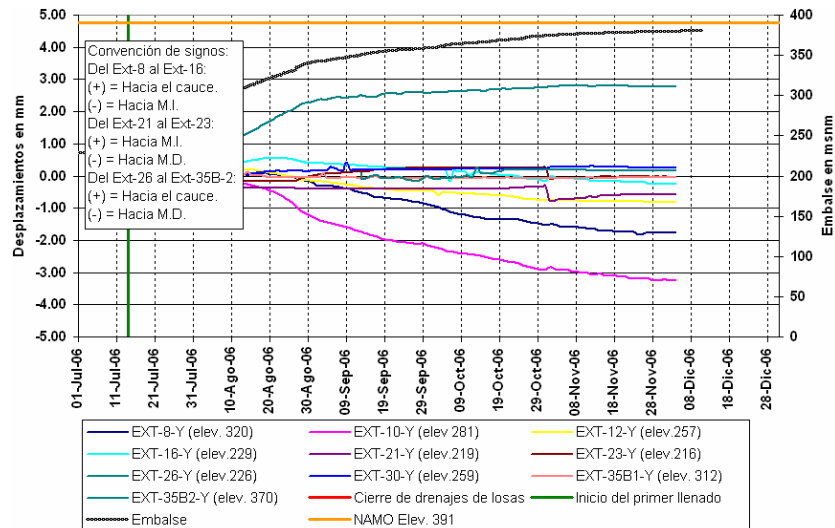


Fig. IV.44. Movimientos perpendiculares al cauce (Dirección Y). Extensómetros tridimensionales. Fecha base del primer llenado.

La dirección Z mide las deformaciones de asentamientos o bufamientos de la losa respecto al plinto, todos los aparatos marcaron una tendencia hacia el asentamiento teniendo máximos en las losas más cercanas al cauce, el mayor valor medido fue en la losa L-16 con 23 mm.

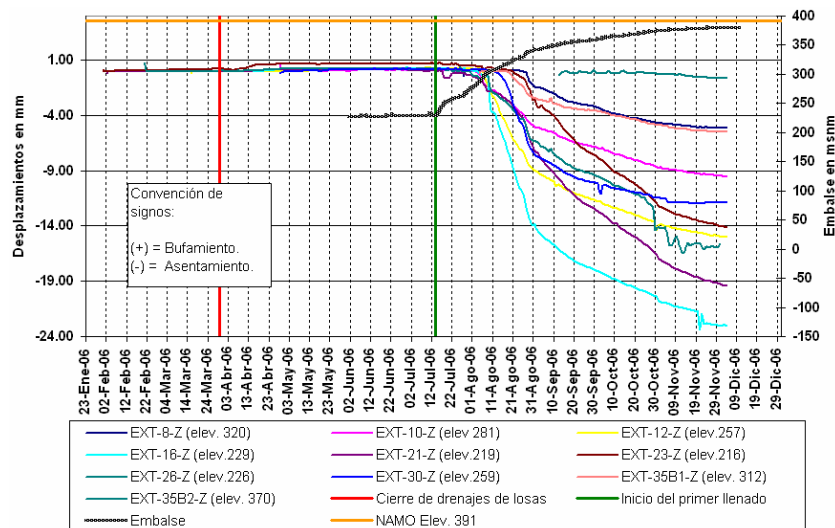


Fig. IV.45. Movimientos normales a la losa (Dirección Z). Extensómetros tridimensionales.

Dado que al final de la construcción algunos aparatos marcaban bufamientos (tal es el caso del EXT-16) el mayor desplazamiento con fecha base del primer llenado fue de 23,2 mm para dicho aparato; todos los demás aparatos marcaron también asentamientos tomando esta fecha.

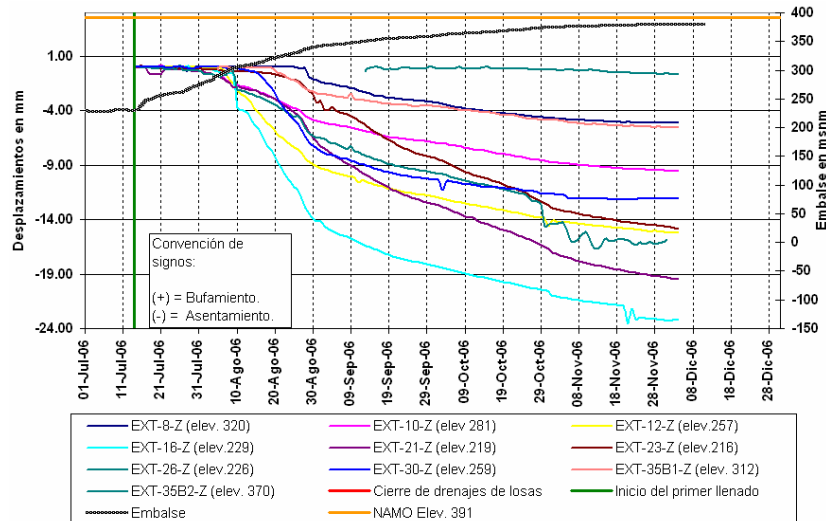


Fig. IV.46. Movimientos normales a la losa (Dirección Z). Extensómetros tridimensionales. Fecha base del primer llenado.

IV.4.4. Desplazamientos juntas losa-parapeto.

Los desplazamientos relativos entre las losas de la cara de concreto y el parapeto se midieron con la ayuda de extensómetros bidireccionales, los cuales registran movimientos en las direcciones (X y Z); a continuación se explicarán ambas direcciones así como los resultados de las lecturas.

Estos aparatos comenzaron a registrar lecturas a partir del 7 de noviembre de 2006, y hasta el final del primer llenado únicamente se habían instalado aparatos en las secciones de las losas L-8, L-12, L-16 y L-21, por estas dos razones no todos los resultados obtenidos son representativos al comportamiento de la junta durante el llenado.

La dirección X registra los movimientos de apertura o cierre de la junta losa-plinto, al final del llenado los valores que se obtuvieron en los aparatos instalados fueron con tendencia a la apertura con movimientos mayores hacia el centro de la cortina, en la sección L-21 se midieron 0,90 mm de apertura; por otro lado, en la sección L-8B la última lectura fue de 0,10 mm marcando cierre de la junta, no obstante este valor en la siguiente gráfica se puede percibir que la tendencia de la junta en esta zona de la cortina también es hacia la apertura.

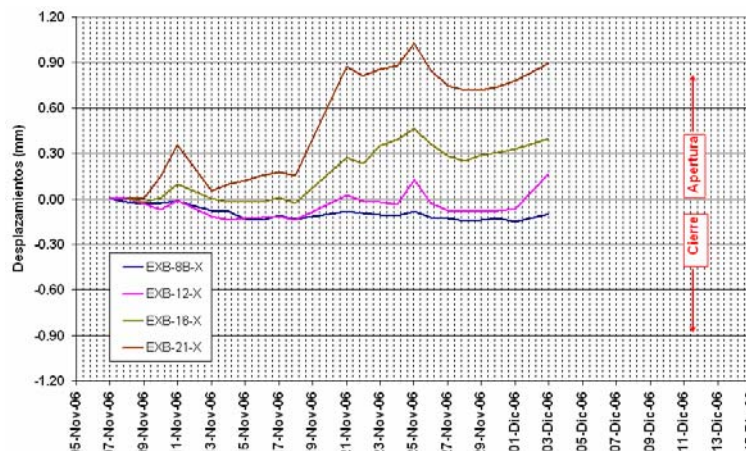


Fig. IV.47. Movimientos de apertura o cierre de la junta losa-parapeto. (Dirección X). Extensómetros bidimensionales.

En la dirección Z se miden los asentamientos o bufamientos de la losa de concreto respecto al parapeto, en todos los aparatos instalados se registraron bufamientos con el valor máximo



0,36 mm; sin embargo, en las últimas lecturas es posible notar un cambio en la tendencia por lo que se pueden esperar asentamientos en lecturas futuras.

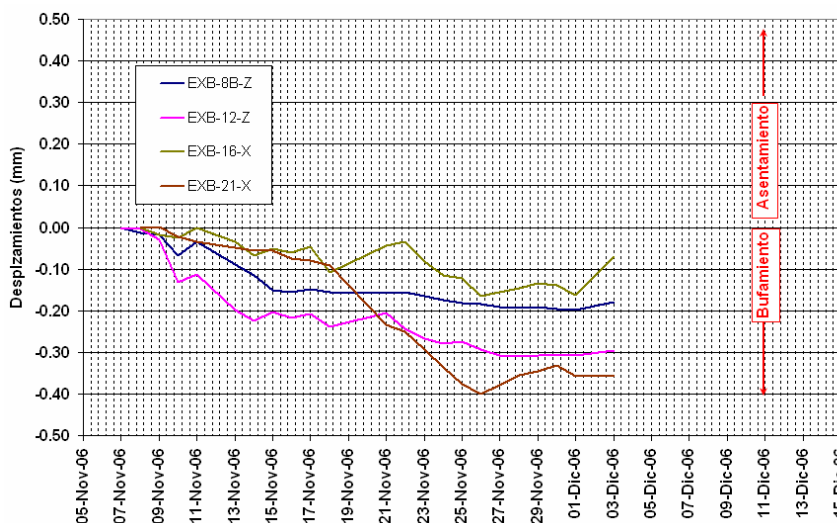


Fig. IV.48. Movimientos de asentamientos de la junta losa-parapeto. (Dirección Z). Extensómetros bidimensionales.

IV.4.5. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.

Los extensómetros unidireccionales fueron colocados para medir desplazamientos en juntas losa-losa, por lo que fueron colocados con dos propósitos: el primero para medir los desplazamientos debidos a la compresión en la zona central de la cara de concreto, y el otro para medir los desplazamientos causados por la tensión en las zonas cercanas a los empotramientos de la cortina.

Los extensómetros instalados para medir las compresiones de la cara de concreto fueron colocados entra las losas L-20, L-21, L-22 y L-23; a las elevaciones 330 y 361. En la elevación 330 se comenzaron a medir desplazamientos en estos aparatos el 13 de agosto de 2006, durante este periodo los desplazamientos fueron de cierre entre las losas, el máximo movimiento fue entre las losas L-21 y L-22 de 2,2 mm al 3 de diciembre de 2006, las otras dos juntas registraron movimientos de 0,2 mm para la misma fecha.

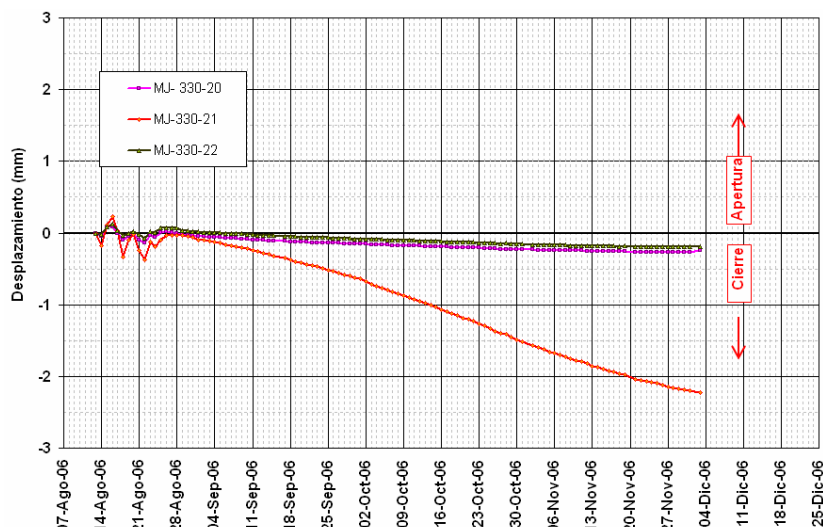
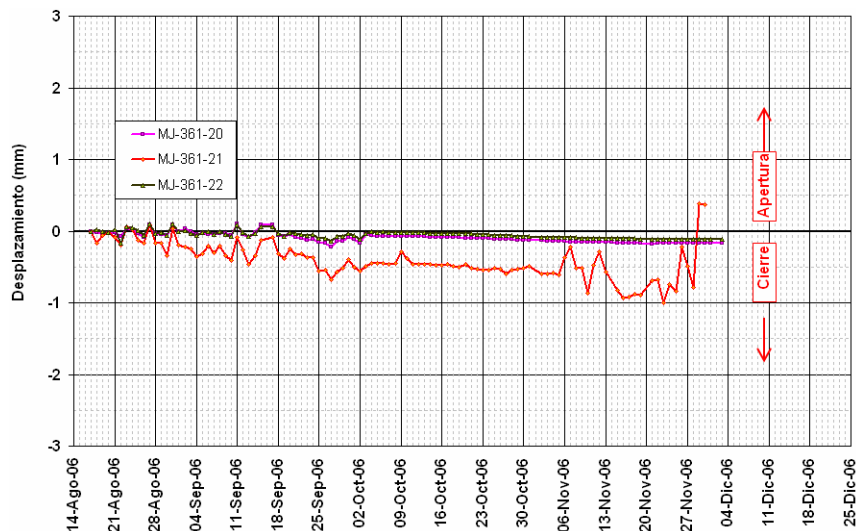


Fig. IV.49. Desplazamientos en losas de compresión. Extensómetros unidireccionales. Elev. 330.



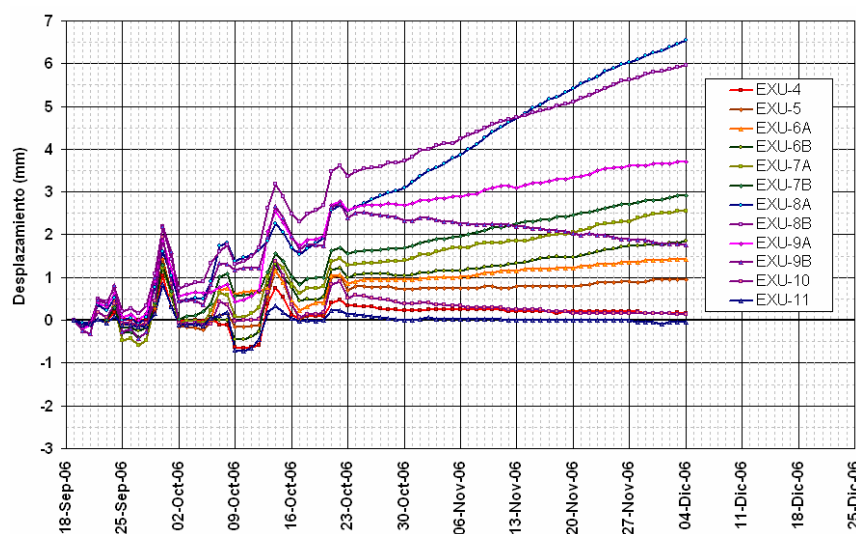
Los desplazamientos medidos en la elevación 361 también fueron de cierre teniendo como valor máximo 0,5 mm entre las losas L-21 y L-22, en las otras juntas los desplazamientos también fueron de cierre pero menores a 0,2 mm al 28 de noviembre; sin embargo, en la junta entre las losas L-21 y L-22 se registró un cambio súbito el día 29 de noviembre hacia la apertura de la junta, llegando al valor máximo de 8,05 mm al final del llenado y por la tendencia que marca esta junta es posible esperar que la apertura aumente.



**Fig. IV.50. Desplazamientos en losas de compresión.
Extensómetros unidireccionales. Elev. 361.**

Los extensómetros unidireccionales instalados para medir las tensiones fueron colocados a la cota 370, en zonas cercanas a los empotramientos.

En la margen izquierda se colocaron extensómetros entre las losas L-4, L-5, L-6A, L-6B, L-7A, L-7B, L-8A, L-8B, L-9A, L-9B, L-10, L-11 y L-12. Los desplazamientos en estas juntas fueron de apertura a excepción de la junta ubicada entre las losas L-11 y L-12 que midió un cierre de 0,05 mm debido a que se acerca a la zona de compresión. El máximo desplazamiento de apertura se registró al 4 de diciembre de 2006 fue entre las losas L-8A y L-8B de 6,55 mm.



**Fig. IV.51. Desplazamientos en losas de tensión.
Extensómetros unidireccionales. Margen izquierda.**

En margen derecha se colocaron estos aparatos entre las losas L-30, L-31, L-32, L-33A, L-33B, L-34A, L-34B, L-35A y L-35B; también se midieron algunos desplazamientos de



cierre en las losas más cercanas a la zona central de la cortina (L-30, L-31 y L-32) con valor máximo de 0,2 mm entre las dos últimas. El mayor desplazamiento de apertura medido fue de 6,3 mm entre las losas L-33B y L-34A al día 4 de diciembre de 2006.

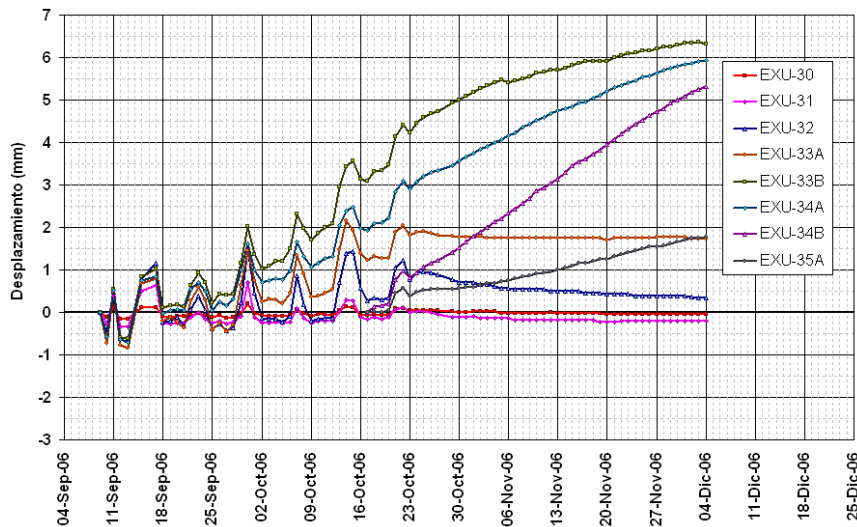


Fig. IV.52. Desplazamientos en losas de tensión.
Extensómetros unidireccionales. Margen derecha.

IV.4.6. Medidores de juntas mecánicas.

Los medidores de juntas mecánicas fueron colocados a la elevación 392, entre las losas L-16, L-17, L-18, L-19, L-20, L-21, L-22, L-23, L-24, L-25, L-26, L-27 y L-28. Estos aparatos comenzaron a registrar lecturas a partir del 18 de agosto de 2006.

Aunque no todas las lecturas tomadas hasta el 27 de octubre de 2006 indican apertura, en la figura se percibe que los medidores de juntas tienen la tendencia a partir del 21 de octubre de 2006, la máxima apertura medida al 27 de octubre fue de 0,95 mm en la losa L-24.

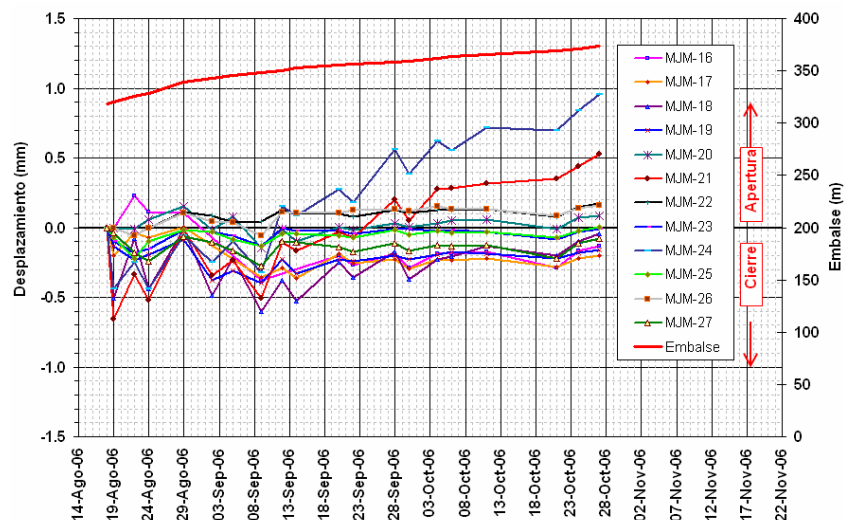


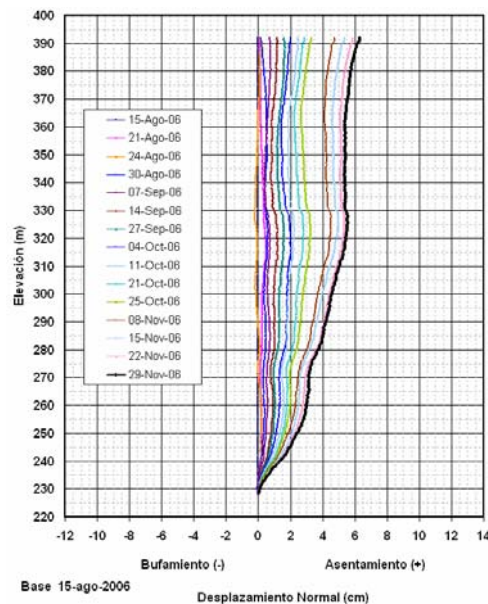
Fig. IV.53. Desplazamientos en elev. 392. Medidores de juntas mecánicas.



IV.4.7. Desplazamientos normales a la cara de concreto.

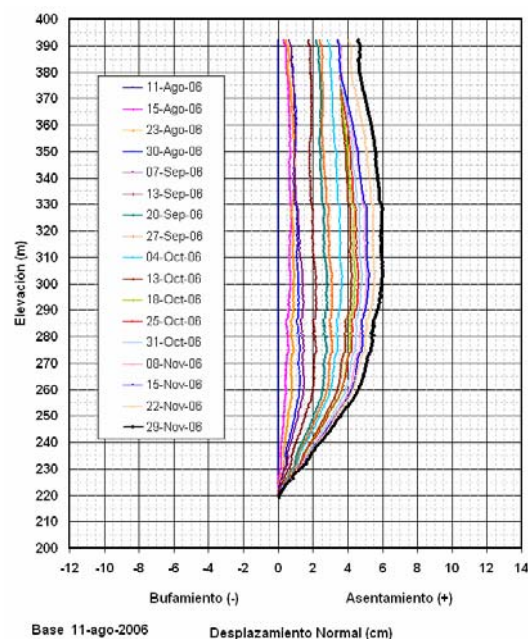
Estos aparatos fueron instalados para conocer la deformación de la cara de concreto a lo largo de una losa, por lo cual fueron colocados en las tres secciones de instrumentación (L-16, L-21 y L-26), para esta etapa se tomó la fecha base del 12 de agosto de 2006.

En la sección L-16 los movimientos fueron de asentamientos, la deformada de la cara de concreto en ésta losa indica una doble curvatura, con máximo desplazamiento de 6,4 cm al 29 de noviembre de 2006 en la parte superior del tubo del inclinómetro.



**Fig. IV.54. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclinómetros inclinados. IL-16. Sección L-16.**

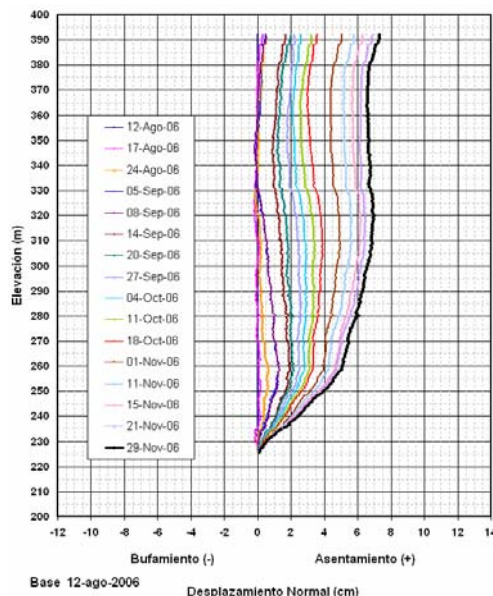
En la losa L-21 se midieron los desplazamientos con el aparato IL-21, registrando máximo desplazamiento normal de 6,0 cm a la elevación 304, lo que corresponde aproximadamente al 50 % de la altura total de la cara de concreto. En esta sección la deformada sufrió curvatura simple.



**Fig. IV.55. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclinómetros inclinados. IL-21. Sección L-21.**



La sección L-26 se comportó de forma similar a la L-16, con doble curvatura y máximo desplazamiento normal en la boquilla del inclinómetro, en este caso de 7,3 cm.



**Fig. IV.56. Desplazamientos normales a la cara de concreto.
Inclinómetros inclinados. IL-26. Sección L-26.**

Únicamente la sección máxima presentó una sola curvatura en la deformada de la cara de concreto, las otras dos secciones presentan doble curvatura, en los análisis realizados durante el diseño se llegó a la conclusión de que se presentaría una curvatura en la cara de concreto, sin embargo, durante el llenado esto no ocurrió.

En la sección máxima es posible percibir en los tubos superiores del inclinómetro IL-21 que se comienza a desarrollar un posible cambio de curvatura, a lo que se le deberá dar seguimiento en etapas posteriores al llenado.

IV.5. Comparación de comportamiento con Aguamilpa.

Para poder comparar las deformaciones sufridas por el efecto del primer llenado entre las presas Aguamilpa y El Cajón es necesario recordar que la velocidad de llenado no fue la misma. Aguamilpa tuvo un llenado que duró 497 días, llegando a la cota 218,91 m lo que significa una carga hidráulica de 168,91 m.

El llenado de El Cajón se consideró hasta el 4 de diciembre de 2006, a 143 días de haber iniciado, llegando a la elevación 350,58 m equivalente a 173,58 m de carga hidráulica.

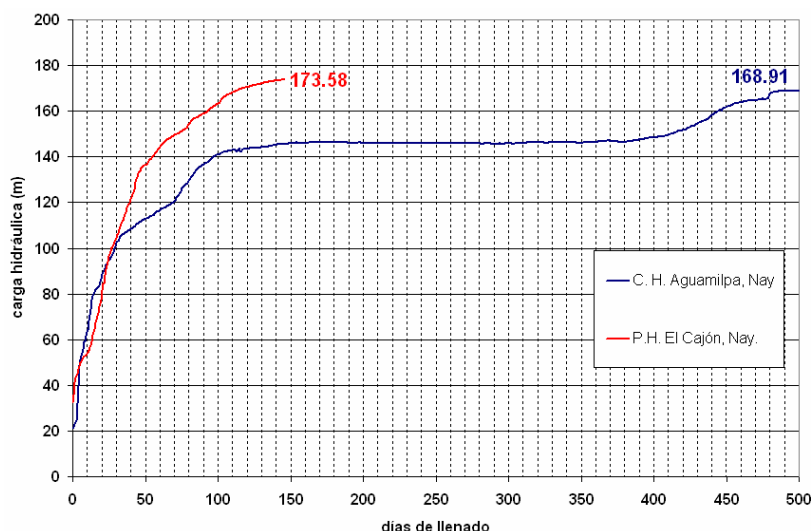


Fig. IV.57. Primer llenado, presas Aguamilpa y El Cajón.

Entonces Aguamilpa tardó arriba de 300 días más que El Cajón en concluir el primer llenado y por lo tanto el tiempo de aplicación del empuje hidráulico fue mayor.

En este capítulo se consideran los instrumentos que por su instalación los hace comparables. Las secciones de comparación son L-18 en Aguamilpa y L-21 en El Cajón, secciones máximas.

IV.5.1. Deformaciones de las presas.

Para comparar los asentamientos sufridos por los terraplenes durante el primer llenado se consideraron los: niveles hidráulicos de asentamientos, inclinómetros y referencias topográficas.

Los niveles hidráulicos de asentamientos instalados en Aguamilpa mostraron que los mayores asentamientos ocurrieron en el material 3C con valores máximos de 26,63 cm en el aparato V-68 ubicado a la cota 180, también se puede notar que los menores asentamientos fueron en el material 3B. En El Cajón los mayores asentamientos se dieron en el material 3B a la elev. 290 en el aparato V-36 ubicado detrás de la cara de concreto con 19,2 cm, los materiales T y 3C tienen efectos mínimos durante el primer llenado.

Los asentamientos en El Cajón tuvieron un mismo rango siendo todos menores a 20 cm, aunque en Aguamilpa los asentamientos en el material 3B fueron pequeños, los de los otros dos materiales fueron grandes en comparación a éste.

En las siguientes figuras se muestran comparaciones a diferentes elevaciones con aparatos representativos de cada material.

En la figura IV.58 se dibujaron los aparatos instalados en la primer plataforma de instrumentación de cada presa, el espesor del terraplén debajo de los NHA justifica que los aparatos se encuentran en condiciones similares y son comparables. Los asentamientos en la primera plataforma de Aguamilpa son uniformes y de valor pequeño comparado con el del material 3B de El Cajón el cual se dispara a 12,7 cm, en este caso en Aguamilpa se tuvieron mayores asentamientos en el material T.

El espesor de material abajo de cada NHA es una de las razones por la cual los asentamientos a esta elevación son mayores para el material 3B de El Cajón y menor para el material 3C de Aguamilpa, el cual es un factor por el cual resulta ser muy deformable.

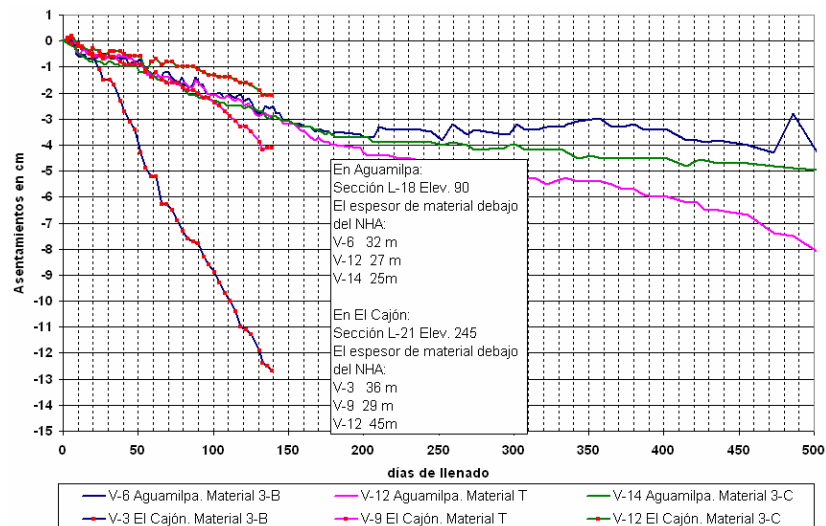


Fig. IV.58. Asentamientos en la primera plataforma de instrumentación.

En la segunda plataforma de asentamientos es mas notoria la diferencia que sufrió el material 3B con respecto a los materiales T y 3C de Aguamilpa, mientras en El Cajón se mantuvo una relación de dos entre la deformación del material 3B y el material T.

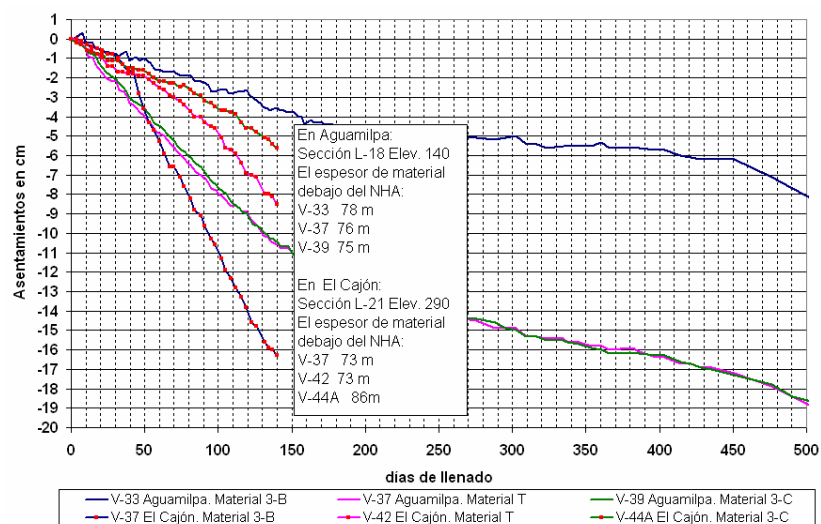


Fig. IV.59. Asentamientos en la segunda plataforma de instrumentación.

Para la tercera plataforma de instrumentación se hace aún mas clara la disposición de los asentamientos en Aguamilpa y se refleja una mayor uniformidad en los asentamientos de El Cajón, uno de los objetivos de diseño.

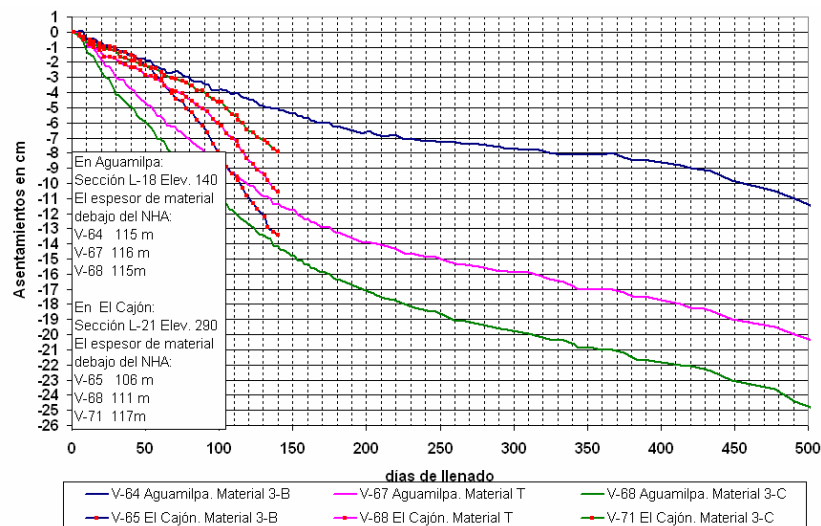


Fig. IV.60. Asentamientos en la tercera plataforma de instrumentación.

En la figura IV.61 se muestran los asentamientos de los niveles hidráulicos instalados detrás de la cara de concreto, la diferencia entre ambas presas es grande debido a que en Aguamilpa esta zona fue la de menores deformaciones y en El Cajón estos aparatos midieron los mayores asentamientos.

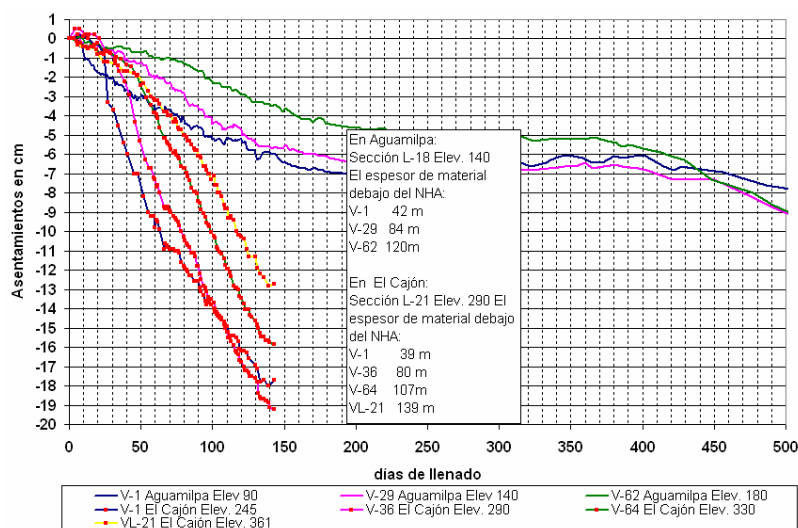
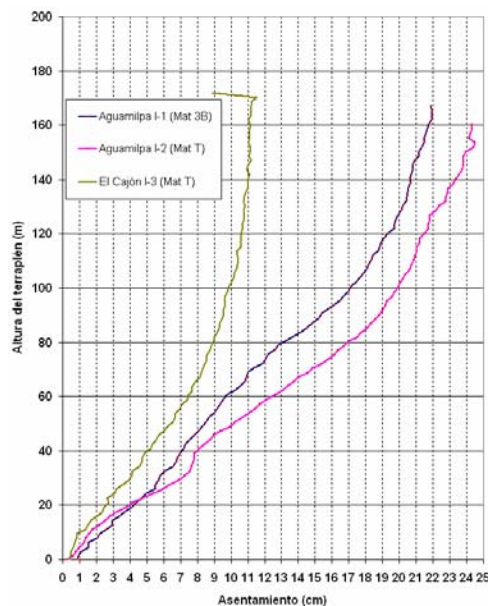


Fig. IV.61. Asentamientos detrás de la cara de concreto.

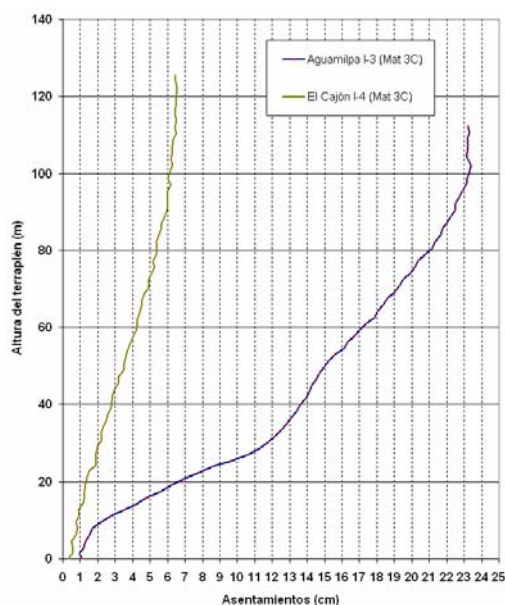
Los inclinómetros se compararon en las secciones máximas de cada presa tomando en consideración la altura del terraplén en el lugar de su instalación.

En la figura IV.62 se muestran los asentamientos en el inclinómetro I-1 de Aguamilpa instalado a pocos metros del eje de la cortina en donde el terraplén está constituido por material 3B y tiene 167 m de altura, el inclinómetro I-2 de Aguamilpa instalado hacia aguas abajo del eje de la cortina en el material T en donde el terraplén mide 160 m de altura y el inclinómetro I-3 de El Cajón instalado sobre material T en el eje de la cortina con una altura de 172 m. Los mayores asentamientos al final del primer llenado se midieron en Aguamilpa en particular en el material T con 24,3 cm, en el material 3B el máximo asentamiento fue de 13,9 cm, ambos en la boquilla del aparato. En El Cajón la mayor deformación se midió también en la parte superior del terraplén y fue de 11,5 cm.



**Fig. IV.62. Asentamientos en inclinómetros instalados en el eje de la cortina.
Sección máxima.**

En la figura IV.63 se muestran los inclinómetros instalados en el respaldo aguas abajo de ambas cortinas. En el caso de Aguamilpa es el inclinómetro I-3 con 112 m de altura y en El Cajón es el inclinómetro I-4 con 125 m de altura; ambos fueron instalados en el material 3C. En Aguamilpa el máximo asentamiento fue de 23 cm, en El Cajón fue de 6,5 cm ambos en la altura máxima del terraplén. La diferencia de asentamientos entre los materiales 3C fue mas marcada que en el material T, mientras en la figura anterior se tenían diferencias de asentamientos del orden de 10 cm en está gráfica se puede ver una diferencia mayor a 15 cm.

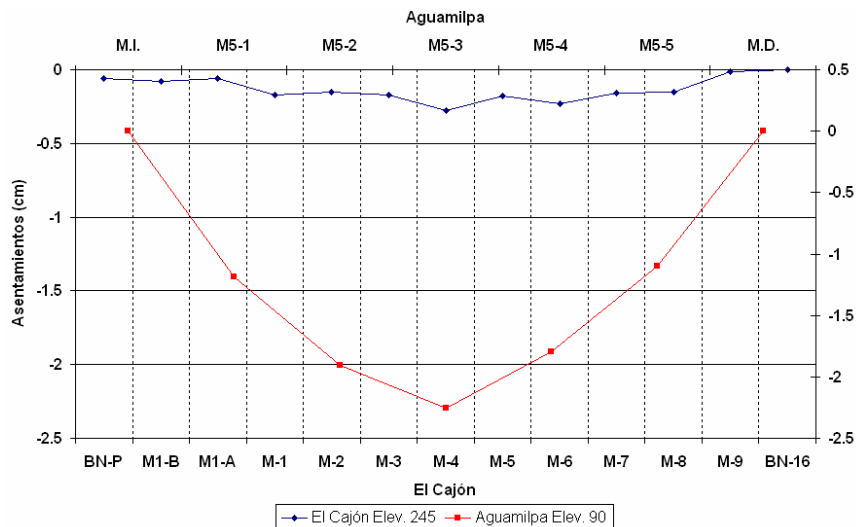


**Fig. IV.63. Asentamientos en inclinómetros instalados en el respaldo aguas abajo.
Sección máxima.**

Las referencias topográficas se compararon en función de la plataforma en la que fueron instaladas, se debe tomar en cuenta que los asentamientos dependen del espesor de material debajo del instrumento y esto a su vez depende de la topografía de la boquilla. La primer plataforma de instrumentación fue a la cota 90 en Aguamilpa y a la 245 en El Cajón,

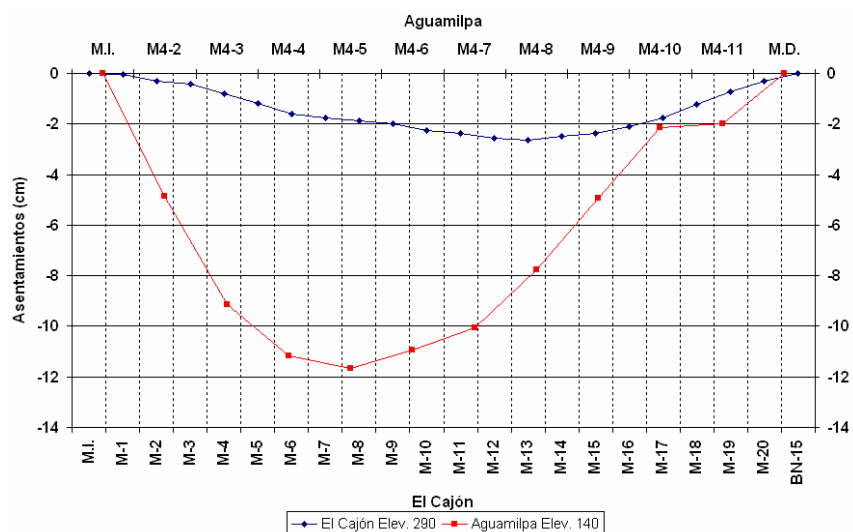


en Aguamilpa los máximos asentamientos ocurrieron en la zona central con 2,3 cm, en El Cajón la máxima deformación fue de 0,3 cm al centro del terraplén.



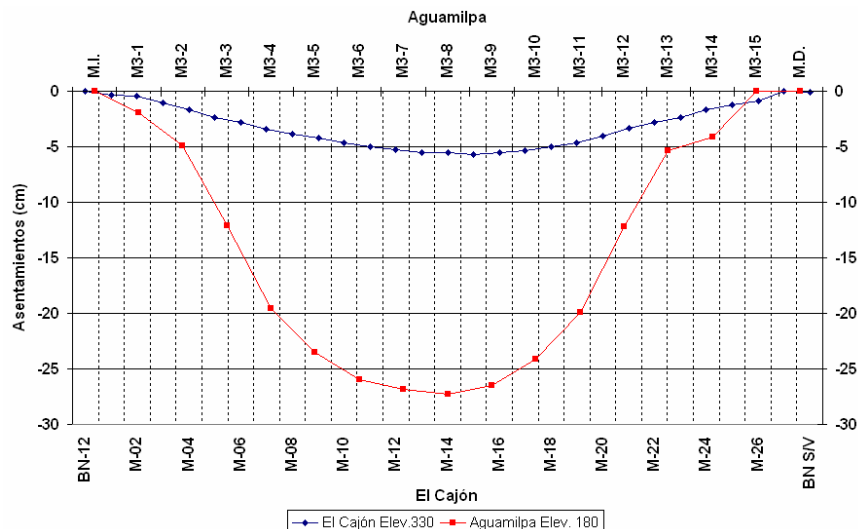
**Fig. IV.64. Asentamientos en referencias topográficas.
Primera plataforma de instrumentación.**

En la segunda plataforma se consideraron la elevación 140 en Aguamilpa y 240 en El Cajón, en la primera el máxima asentamiento fue hacia margen izquierda en la zona correspondiente al cauce del río con 11,7 cm. En El Cajón el mayor asentamiento fue de 2,6 cm hacia la margen derecha, también en zona cercana al cauce del río.



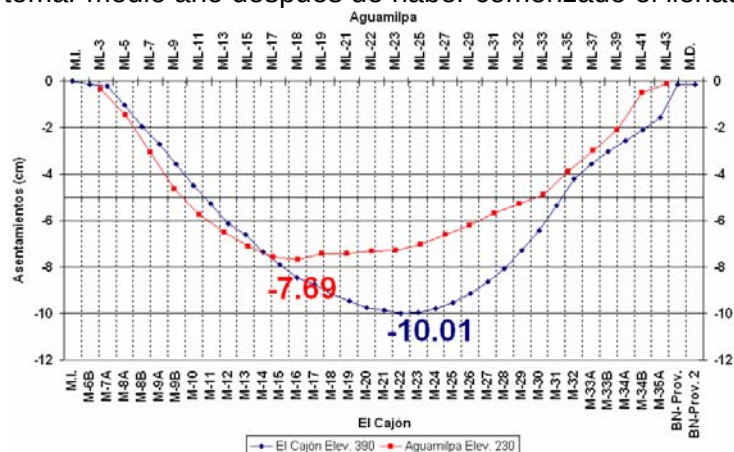
**Fig. IV.65. Asentamientos en referencias topográficas.
Segunda plataforma de instrumentación.**

Para la tercera plataforma de instrumentación se colocaron las referencias topográficas a las elevaciones 180 en Aguamilpa y 330 en El Cajón. En Aguamilpa el máximo asentamiento fue de 27,3 cm en la zona central del terraplén, en El Cajón el mayor asentamiento fue también al centro de la cortina de 5,7 cm.



**Fig. IV.66. Asentamientos en referencias topográficas.
Tercera plataforma de instrumentación.**

Las siguientes líneas que se consideraron fueron cercanas a la corona en Aguamilpa a la elev. 229 y en El Cajón a la 330, ambas en el respaldo aguas abajo. En Aguamilpa el asentamiento máximo fue de 7,7 cm en la sección correspondiente a la losa L-18 (sección máxima), en El Cajón el mayor asentamiento fue de 10,0 cm en la sección de la losa L-22, zona central de la cortina. En esta línea los asentamientos medidos en El Cajón fueron mayores, es conveniente aclarar que las lecturas en esta línea de referencias de Aguamilpa se comenzaron a tomar medio año después de haber comenzado el llenado.



**Fig. IV.67. Asentamientos en referencias topográficas.
Corona. Aguas abajo.**

Finalmente se comparan las referencias topográficas que se instalaron en las secciones máximas de las presas, en ambas el máximo asentamiento es en la parte superior de la cortina. En Aguamilpa el máximo asentamiento que se midió fue de 29,9 cm a la elev. 200, en El Cajón fue de 10,6 cm a la elev. 380. En Aguamilpa los asentamientos fueron mayores a lo largo de toda la sección máxima.

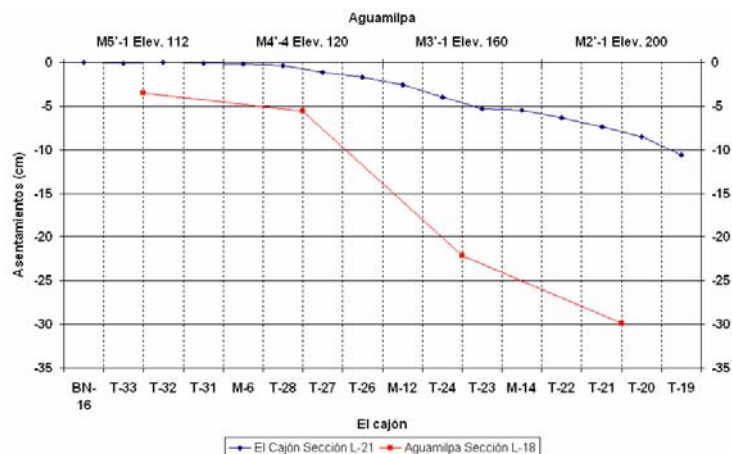


Fig. IV.68. Asentamientos en referencias topográficas. Sección máxima.

Para comparar los desplazamientos horizontales entre las dos presas se cuenta con inclinómetros y referencias topográficas.

Para la primer comparación en Aguamilpa se consideraron los inclinómetros I-1 e I-2 (materiales 3B y T respectivamente) y para El Cajón el aparato I-3 (material T). La primera diferencia que se puede apreciar entre el comportamiento de ambas presas es que, en Aguamilpa los mayores desplazamientos horizontales ocurrieron en la parte más alta del terraplén mientras en El Cajón sucedieron aproximadamente al 60% de la altura del terraplén.

Los desplazamientos en el eje del río fueron mayores en Aguamilpa siendo aproximadamente 24,6 cm para ambos materiales, en El Cajón se tuvo desplazamientos máximos de 5,5 cm, los movimientos fueron hacia aguas abajo en las dos presas.

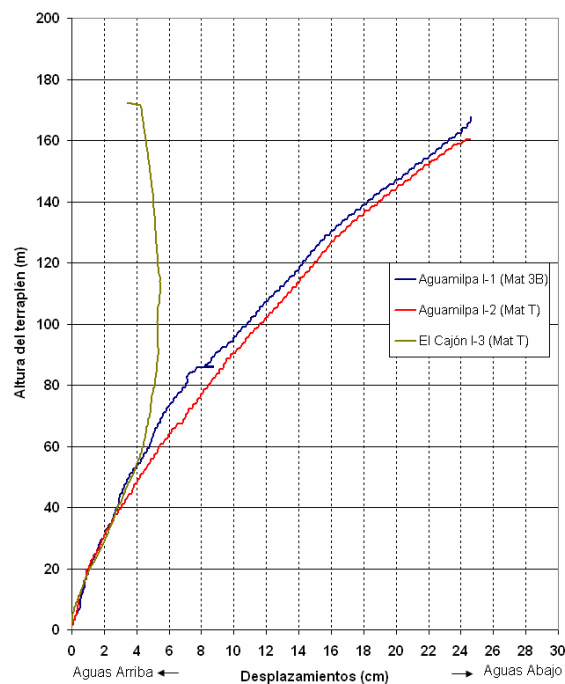


Fig. IV.69. Desplazamientos horizontales. Eje del río. Inclinómetros instalados en el eje de la cortina. Sección máxima.



En el respaldo aguas abajo del terraplén de ambas presas presentaron máximo desplazamiento en la boca de los inclinómetros y hacia aguas abajo, siendo mayor en Aguamilpa con 12,2 cm, mientras que en El Cajón el desplazamiento fue de 4,9 cm.

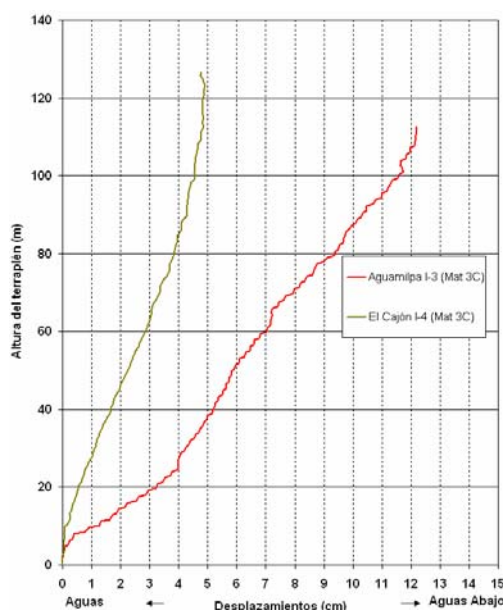


Fig. IV.70. Desplazamientos horizontales. Eje del río.
Inclinómetros instalados en el respaldo aguas abajo de la cortina. Sección máxima.

En los inclinómetros instalados en zonas cercanas al eje de la cortina los desplazamientos fueron pequeños en Aguamilpa para el material 3B (2,9 cm), pero no así para el material T el cual midió un máximo desplazamiento de 12,6 cm, ambos en la boquilla del aparato y hacia margen derecha, esto no es normal debido a que los desplazamientos en la zona central sobre este eje se esperan de magnitudes pequeñas, ya que el movimiento normal de las presas es hacia la zona central y la sección máxima de Aguamilpa se encuentra al centro del cauce. En El Cajón el desplazamiento máximo fue de 1,7 cm en la zona superior del terraplén hacia margen derecha.

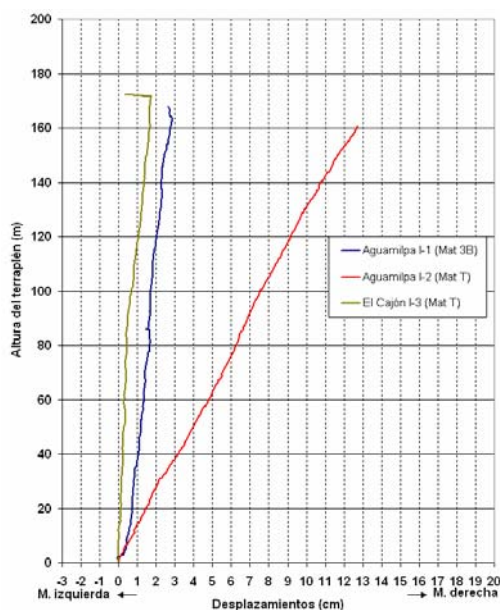


Fig. IV.71. Desplazamientos horizontales. Eje de la cortina.
Inclinómetros instalados en el eje de la cortina. Sección máxima.



En el material 3C los desplazamientos tuvieron magnitudes inferiores a 1,0 cm en ambas presas.

En Aguamilpa los desplazamientos se pueden dividir en tres zonas: una inferior con desplazamiento hacia margen izquierda y valor máximo de 0,5 cm, una central con movimiento hacia margen derecha y máximo de 0,8 cm y una superior con desplazamiento hacia margen izquierda y máximo en la boquilla de 0,8 cm.

En El Cajón todo el inclinómetro I-4 se desplazó hacia margen izquierda pero con valores mínimos, llegando al mayor desplazamiento de 0,3 cm al 70 % de la altura total del terraplén.

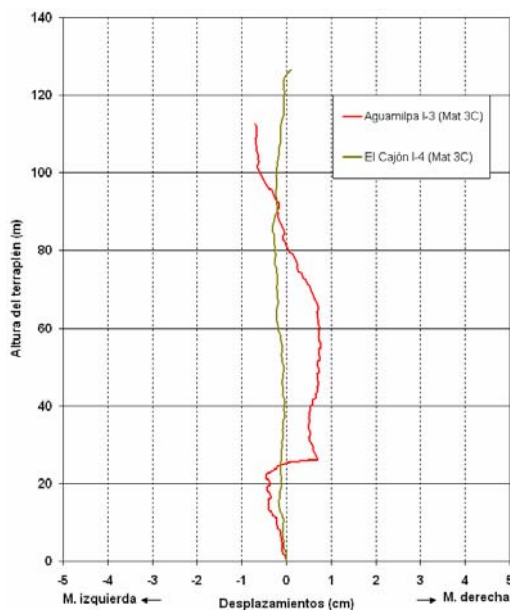


Fig. IV.72. Desplazamientos horizontales. Eje de la cortina.
Inclinómetros instalados en el respaldo aguas abajo de la cortina. Sección máxima.

En este caso aunque en El Cajón se midieron desplazamientos tanto en la dirección del río como de la cortina con referencias superficiales, en Aguamilpa solamente se realizaron en el eje del río por lo que es la única comparación que se presentará en estos aparatos.

En la primera plataforma de instrumentación el máximo desplazamiento en Aguamilpa fue en la zona central de 4,2 cm hacia aguas abajo. En El Cajón los movimientos también fueron hacia aguas abajo con el valor máximo de 0,3 cm en la zona central de la cortina.

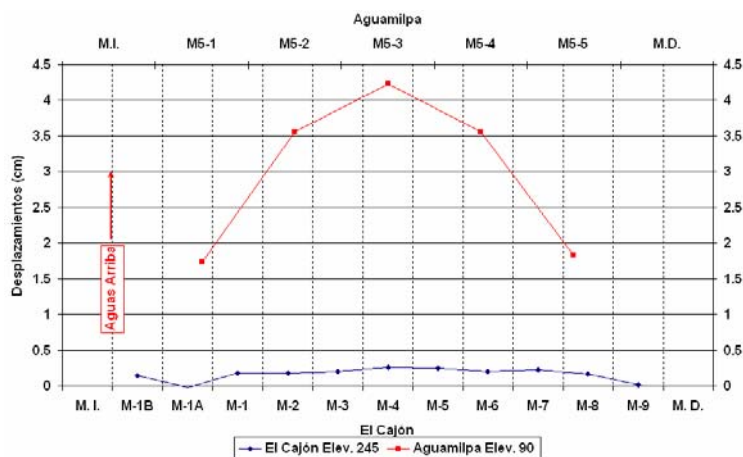


Fig. IV.73. Desplazamientos horizontales en referencias topográficas.
Eje del río. Primera plataforma de instrumentación.



En la segunda plataforma de instrumentación los desplazamientos en Aguamilpa se ven claramente influenciados por la topografía de la boquilla, siendo menores hacia la margen derecha, el mayor movimiento fue de 11,5 cm hacia aguas abajo al centro del terraplén. En El Cajón los desplazamientos fueron menores pero se presentan los mayores movimientos en la margen derecha de la cortina, con el valor máximo de 2,4 cm sobre dicha margen.

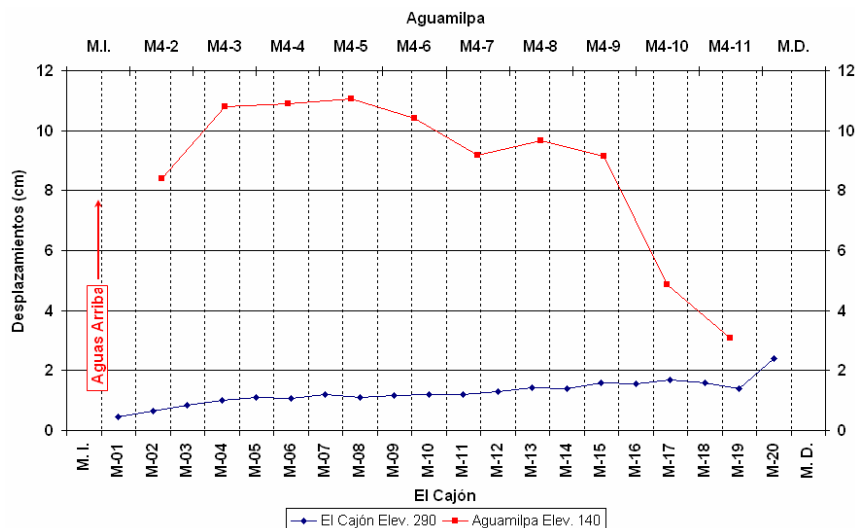


Fig. IV.74. Desplazamientos horizontales en referencias topográficas. Eje del río. Segunda plataforma de instrumentación.

En la tercera plataforma de instrumentación Aguamilpa sigue reflejando en sus desplazamientos la topografía del cañón, sus desplazamientos son hacia aguas abajo y el máximo se localiza en la zona central con 16,4 cm. Para las referencias de El Cajón se midieron desplazamientos hacia aguas abajo relativamente iguales en la zona central del terraplén que varían de 2,0 a 3,0 cm, desde la margen izquierda hacia la derecha, las lecturas mayores se encuentran en esta última.

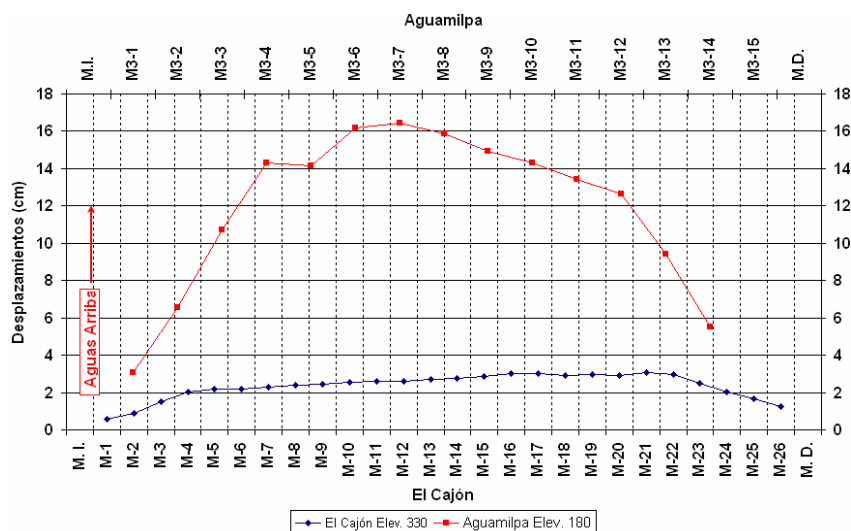


Fig. IV.75. Desplazamientos horizontales en referencias topográficas. Eje del río. Tercera plataforma de instrumentación.

La última línea que se puede comparar de referencias topográficas en el terraplén es la instalada en la corona de las cortinas sobre el respaldo aguas abajo. En Aguamilpa se tuvieron mayores desplazamientos hacia la margen izquierda con valor máximo de 5,0 cm hacia aguas abajo, hay que recordar que en esta línea se tiene una fecha base de seis meses posterior al inicio del primer llenado. En El Cajón los mayores desplazamientos



fueron en la zona central de la cortina, el máximo movimiento fue de 2,9 cm hacia aguas abajo.

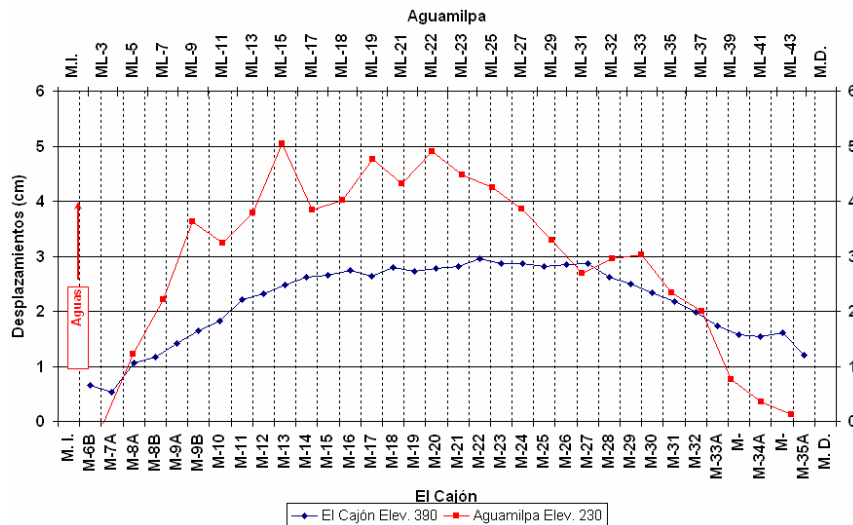


Fig. IV.76. Desplazamientos horizontales en referencias topográficas. Eje del río. Corona. Aguas abajo.

Tanto en los inclinómetros como en las referencias topográficas se observa que los desplazamientos fueron mayores en Aguamilpa, y en particular, en la dirección del eje del río la diferencia es muy marcada.

IV.5.2. Módulos de deformación.

En la primera plataforma de instrumentación para la presa Aguamilpa los mayores módulos fueron en el material 3B y los menores en el material 3C con valores de 2 048, 1 536 y 661 MPa para los materiales 3B, T y 3C, respectivamente a los 140 días de llenado (días considerados para el llenado de El Cajón), y 1 200, 580 y 390 MPa en el mismo orden al final del llenado. Los módulos obtenidos para El Cajón fueron mayores para el material 3C y menores para el material 3B con valores de 1 910 y 368 MPa respectivamente y 1 283 MPa en el material T.

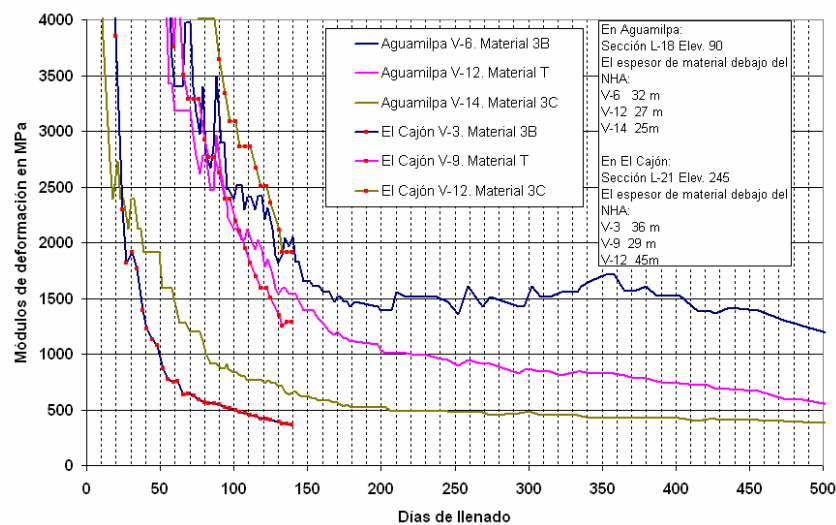


Fig. IV.77. Módulos de deformación (Penman).NHA. Primera plataforma de instrumentación.



Para la segunda plataforma de instrumentación el comportamiento de Aguamilpa fue similar al mostrado en la primera plataforma con módulos de 2 131, 684 y 324 MPa a los 140 días de llenado y 1 341, 422 y 197 MPa al final del primer llenado para los materiales 3B, T y 3C, respectivamente. En El Cajón se obtuvieron los siguientes resultados al final del primer llenado: 1 157 MPa para el material T, 834 MPa para el material 3C y, 379 MPa para el material 3B.

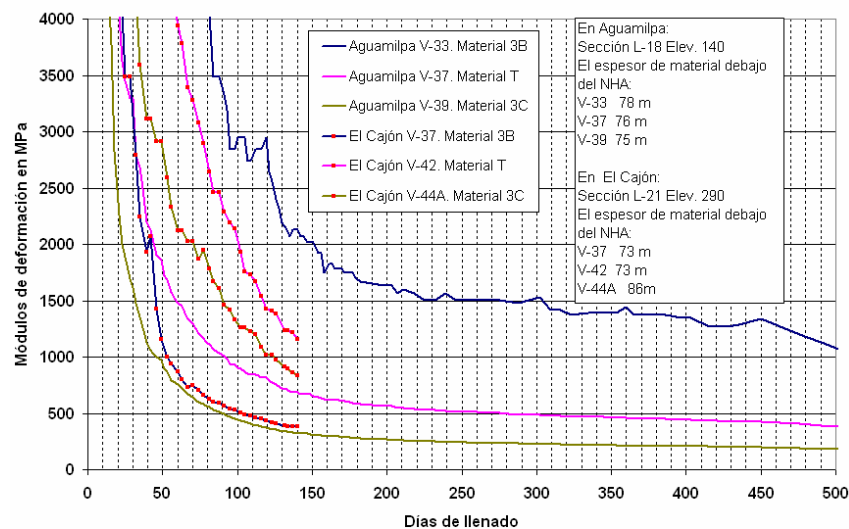


Fig. IV.78. Módulos de deformación (Penman).NHA. Segunda plataforma de instrumentación.

En Aguamilpa el comportamiento es el mismo para las tres plataformas de instrumentación, en la tercera los resultados de los módulos de deformación fueron 1 183, 697 y 238 MPa, a los 140 días de llenado y; 601, 394 y 139 MPa al final del llenado para los materiales 3B, T y 3C. En la tercera plataforma de instrumentación de El Cajón se presentó el mismo comportamiento que en la segunda plataforma, siendo mayores los módulos en el material T con 873 MPa, seguido por el material 3C con 461 MPa y los menores valores se presentaron en el material 3B con 427 MPa.

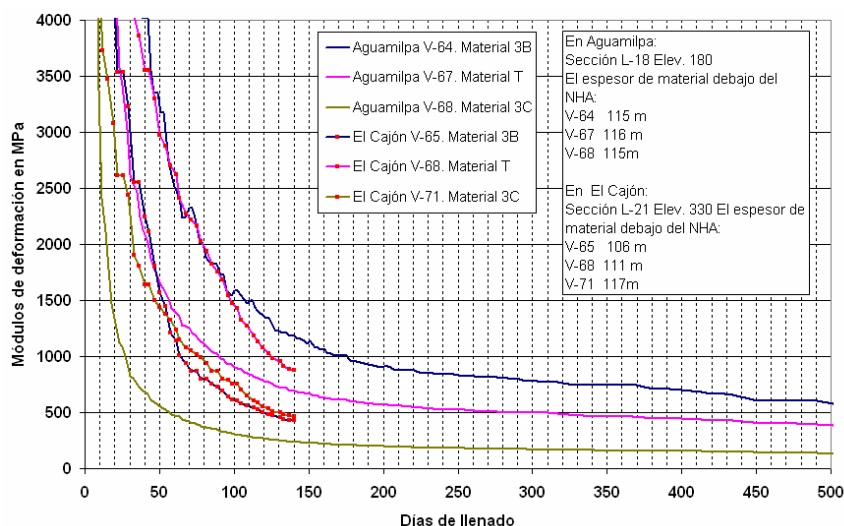


Fig. IV.79. Módulos de deformación (Penman).NHA. Tercera plataforma de instrumentación.

Este análisis es un reflejo de la deformabilidad de los materiales durante la etapa del primer llenado, en Aguamilpa en todo momento la diferencia entre los módulos de los materiales fue grande, en el mejor de los casos el valor del módulo en el material 3B fue cercano al doble al del material T.



Por otro lado en El Cajón los módulos de deformación de todos los materiales fueron menores a los de Aguamilpa, lo que implica una mayor deformabilidad, sin embargo, la proporción entre los módulos de cada material es menor que en Aguamilpa, esto fue uno de los propósitos del diseño de la cortina para garantizar deformaciones similares entre los materiales que conforman el terraplén.

- Fitzpatrick.

Si recordamos los capítulos anteriores, la expresión de Fitzpatrick nos permite evaluar los módulos de deformación considerando la dirección normal del empuje hidrostático del embalse y el desplazamiento asociado a dicho empuje.

Sin embargo, al aplicarlo a los NHA se comete un error por no conocer la componente horizontal de los desplazamientos y es por eso que este cálculo solamente sirve para obtener conclusiones cualitativas.

Por lo anterior y sabiendo que para evaluar esta expresión el embalse debe rebasar la cota a partir de la cual este tiene una carga en dirección normal al lugar de instalación del aparato, se tiene que, no todos los aparatos se encuentran bajo esta condición durante el primer llenado y no es representativo comparar todos los materiales ni todas las elevaciones, no obstante, se mencionarán a continuación los resultados en cada aparato seleccionado anteriormente para esta comparación.

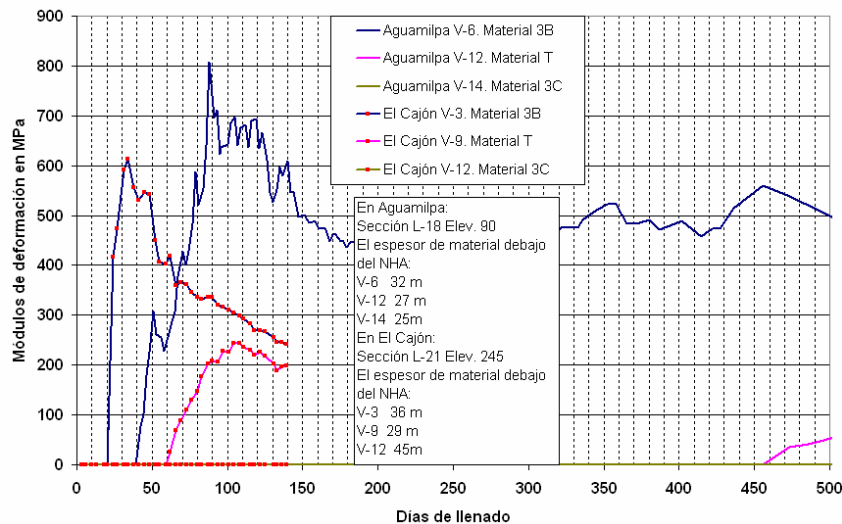
Los resultados de este análisis se ven influenciados drásticamente por la velocidad de llenado, dado que, está determina en que momento comienza a actuar la carga hidráulica del embalse sobre un punto dado del terraplén y, con que velocidad variará respecto al tiempo.

El material mas sensible a los efectos considerados en este análisis es el material 3B puesto que este es el primero en estar bajo el efecto del empuje del embalse, los demás materiales no muestran resultados significativos para la comparación.

En la primera plataforma de instrumentación el NHA seleccionado para el material 3B de El Cajón (V-3) estuvo bajo el efecto de la carga hidráulica del embalse después de 20 días de llenado, en el aparato seleccionado para Aguamilpa (V-6) fue a partir del día 39.

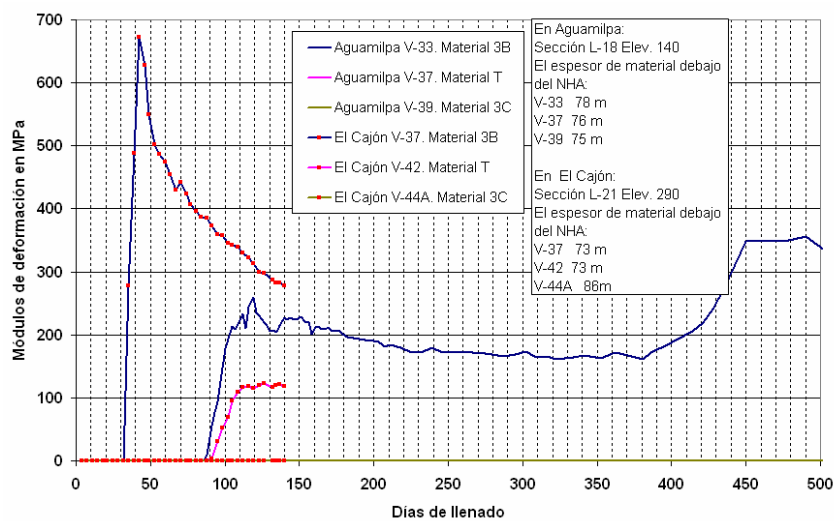
Ambas presas mostraron un comportamiento similar en esta plataforma, pero los valores de los módulos en Aguamilpa fueron considerablemente mayores que en El Cajón. Aguamilpa presentó en el primer pico un módulo de deformación del orden de 800 MPa, a los 140 días de llenado alrededor de 600 MPa y al final del llenado presentó módulos del orden de 500 MPa.

En El Cajón el primer pico fue de un módulo de deformación de poco más de 600 MPa y al final del llenado fue de casi 250 MPa, en el material T se tuvieron valores a partir del día 62 llegando casi a 200 MPa al final del llenado; sin embargo, esta cantidad no es comparable con los resultados obtenidos en Aguamilpa, dado que en esta el material T comenzó a trabajar bajo el efecto del embalse a partir del día 473 llegando a casi 50 MPa al final del llenado.



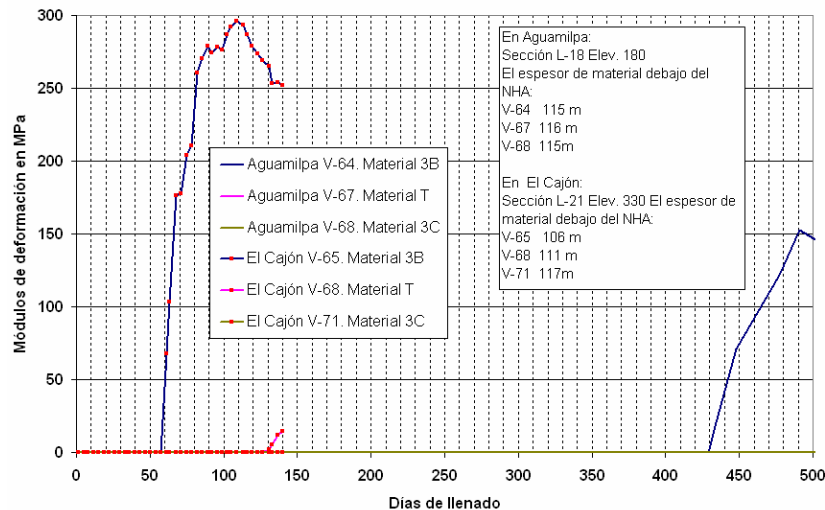
**Fig. IV.80. Módulos de deformación (Fitzpatrick).NHA.
Primera plataforma de instrumentación.**

En la segunda plataforma de instrumentaciones puede observar que para los primeros días bajo efecto del embalse los módulos de deformación del material 3B fueron mayores en El Cajón (230 MPa al final del llenado) debido a que la carga hidráulica fue mayor durante estos días en dicha presa y la velocidad de llenado de Aguamilpa fue menor; pero, para el final del llenado el valor del módulo de deformación en el material 3B de Aguamilpa fue superior (alrededor de 350 MPa). Esto demuestra lo sensible que es esta expresión a la carga hidráulica y a la velocidad de llenado.



**Fig. IV.81. Módulos de deformación (Fitzpatrick).NHA.
Segunda plataforma de instrumentación.**

Los módulos obtenidos para la tercera plataforma de instrumentación no muestran mucho, únicamente es posible observar que en El Cajón los valores son superiores debido a que la carga hidráulica es mayor y que en Aguamilpa esta plataforma estuvo bajo el efecto del llenado hasta después de 429 días de llenado.



**Fig. IV.82. Módulos de deformación (Fitzpatrick).NHA.
Tercera plataforma de instrumentación.**

Con este análisis es posible observar en la primera plataforma de instrumentación que el enrocamiento principal de Aguamilpa fue menos deformable que en El Cajón, en la segunda y tercera plataforma de instrumentación que la velocidad de llenado fue menor en Aguamilpa y por esto el momento a partir del cual las elevaciones superiores del terraplén estuvieron bajo la carga hidráulica del embalse fue posterior al de El Cajón.

Los cálculos de los Módulos de deformación a partir de los asentamientos medidos en inclinómetros durante el primer llenado se realizaron con la expresión propuesta por Penman y comentada en secciones anteriores.

Con los inclinómetros instalados en el terraplén se pueden hacer otra clase de análisis, los aparatos seleccionados para esta sección fueron los que se encuentran en las secciones máximas de cada presa, L-18 en Aguamilpa y L-21 en El Cajón.

En el primer análisis se seleccionaron los aparatos por la altura del terraplén en su lugar de instalación y de esto resulta que los inclinómetros empleados fueron el I-1 instalado en el material 3B e I-2 instalado en el material T de Aguamilpa, y el I-3 en el material T de El Cajón.

Los resultados muestran una etapa inicial en donde los módulos de deformación son mayores para el material T de El Cajón, debido a que los asentamientos en este periodo fueron menores para este material, a partir del día 116 de llenado el módulo es mayor para el material 3B de Aguamilpa.

Lo anterior fue por que los asentamientos en El Cajón fueron mayores y a una mayor velocidad, aun así en esta sección del terraplén y para la etapa del primer llenado los módulos muestran que el material T de El Cajón fue menos deformable que el material de transición de Aguamilpa.

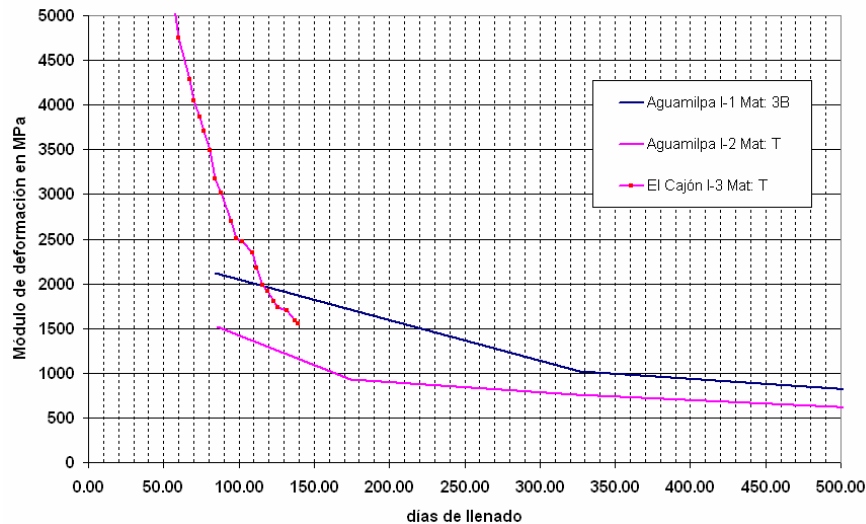


Fig. IV.83. Módulos de deformación. Inclínómetros en el terraplén. Materiales 3B y T.

El otro análisis corresponde a los inclinómetros I-3 de Aguamilpa e I-4 de El Cajón, ambos instalados en el material 3C de la sección máxima de sus respectivas presas.

En la siguiente figura se observa que el módulo de deformación en el material 3C de El Cajón fue de 1 368 MPa al final del llenado y en Aguamilpa fue de alrededor de 320 MPa, esto es un reflejo de la mayor deformabilidad de este material en Aguamilpa.

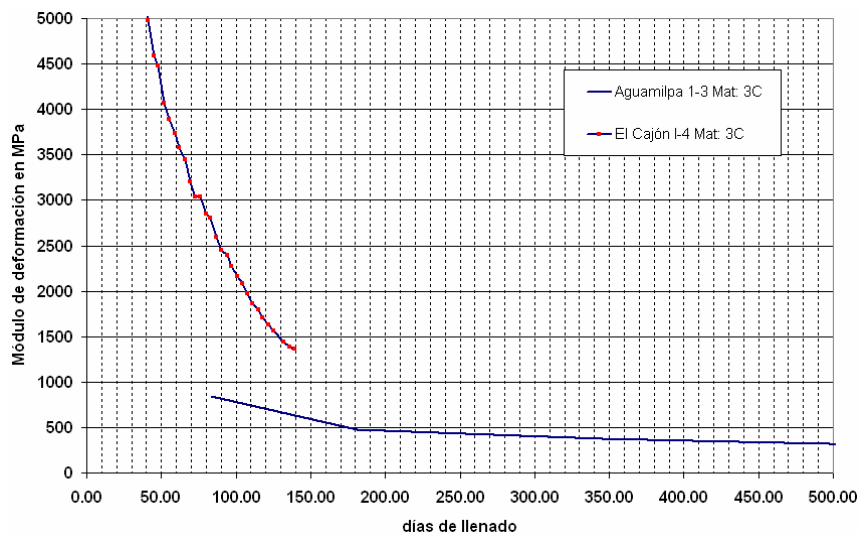


Fig. IV.84. Módulos de deformación. Inclínómetros en el terraplén. Material 3C.

Anteriormente se mencionó el procedimiento empleado para calcular los módulos de deformación con grupos de aparatos, en Aguamilpa las pocas lecturas empleadas para el análisis no permiten obtener un valores muy convincentes de los módulos de deformación.

Se mencionarán los resultados obtenidos, recordando que el valor del módulo en cada caso es el de la pendiente de la recta de ajuste, los módulos de deformación obtenidos se mencionan en la siguiente tabla.



Tabla. IV.10. Comparación de los módulos de deformación obtenidos en Grupos de celdas de presión y extensómetros.

Módulo de deformación	Presa	Grupo	Ubicación	Material	Valor del módulo de deformación (MPa)
Normal, E	Aguamilpa	G-12	1ª plataforma de instrumentación	3B	3 593,83
	El Cajón	G-1	1ª plataforma de instrumentación	3B	63,30
	El Cajón	G-2	1ª plataforma de instrumentación	T	49,76
Cortante, G	Aguamilpa	G-12	1ª plataforma de instrumentación	3B	1 862,52
	Aguamilpa	G-17	2ª plataforma de instrumentación	3B	28,14
	El Cajón	G-1	1ª plataforma de instrumentación	3B	18,44
	El Cajón	G-2	1ª plataforma de instrumentación	T	92,54

La tabla muestra que la diferencia entre los módulos del material 3B de Aguamilpa es mucho mayor que cualquier otro material considerado en esta comparación, la razón es la poca deformabilidad de este material.

Por otro lado los valores del material T de El Cajón son mayores que los del material 3B de la misma presa, aunque la deformabilidad del material 3B es menor, sus módulos resultaron también menores debido a que durante la etapa del primer llenado las deformaciones en el material T fueron mínimas.

La última observación que se puede hacer con de estos cálculos es que el menor módulo cortante que se obtuvo fue en el material 3B de Aguamilpa, valor contrastante con el máximo anteriormente comentado, y el cual se debe analizar con ciertas reservas recordando que para este aparato se tuvo una cantidad muy limitada de mediciones para realizar los cálculos y lo que acarrea errores en los resultados.

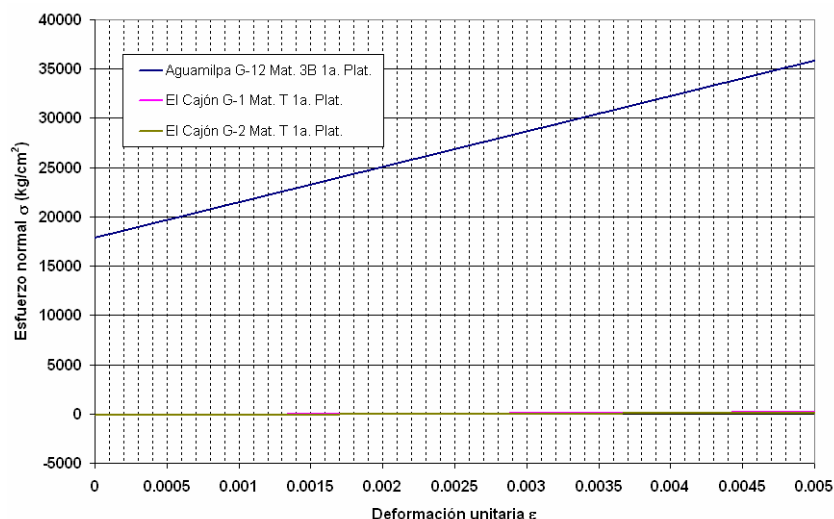
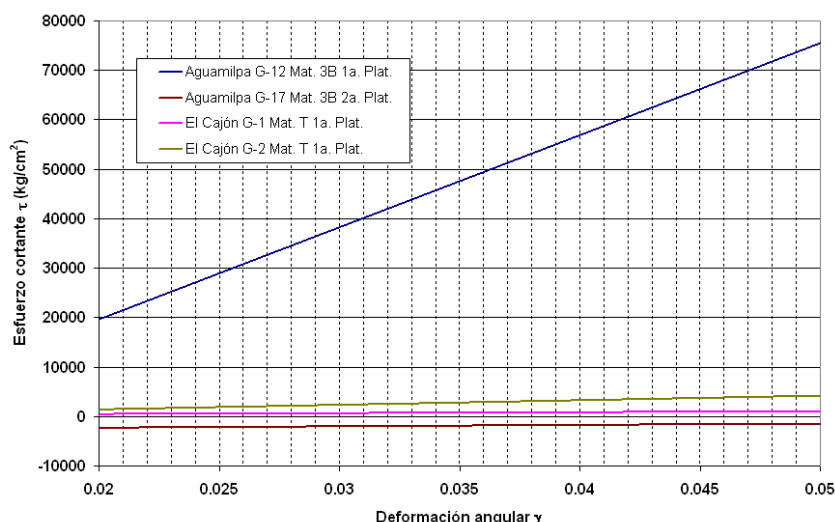


Fig. IV.85. Módulos de deformación. Módulo E. Grupos de Celdas de Presión y Extensómetros.



**Fig. IV.86. Módulos de deformación. Módulo G.
Grupos de Celdas de Presión y Extensómetros.**

IV.5.3. Niveles de agua en el terraplén.

Para comparar los niveles de agua en las cortinas de las presas Aguamilpa y El Cajón se tomaron en cuenta los instrumentos colocados en las secciones máximas de cada presa así como las filtraciones de las galerías construidas al pie de las cortinas.

IV.5.3.1. Niveles piezométricos.

En Aguamilpa se reportaron mediciones en cuatro piezómetros neumáticos los cuales dejaron de funcionar antes de concluir el llenado y tres inclinómetros sobre la sección máxima (L-18).

A pocos días de iniciado el primer llenado se registró un cambio súbito en todos los aparatos de alrededor de 4 m en el nivel de agua, y el cual duró hasta 20 días, posteriormente el terraplén tuvo niveles estables hasta 430 días de llenado cuando el embalse alcanzó la elevación 205 m y los niveles subieron otros 3 m aproximadamente.

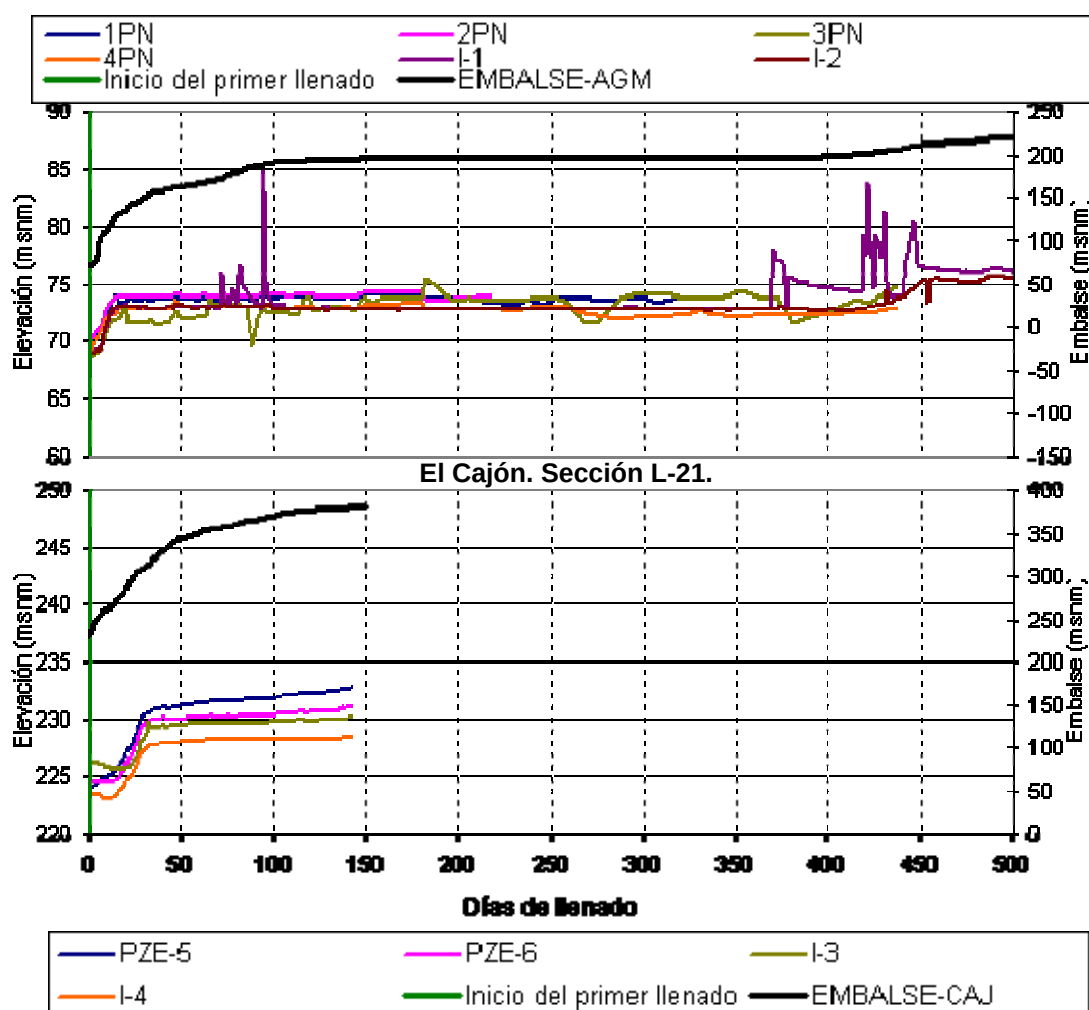
En El Cajón se midieron los niveles piezométricos en la sección máxima (L-21) con dos piezómetros eléctricos y dos inclinómetros.

Al inicio del primer llenado todos los niveles mostraron un incremento de entre seis y tres metros, siendo mayor en la zona más cercana a la cara de concreto, este fenómeno se desarrolló en un lapso de poco menos de 40 días.

Las fechas posteriores y hasta el momento en que se consideró como fecha final del llenado para esta tesis los niveles aumentaron ligeramente, el mayor aumento se registró en el piezómetro atrás de la cara de concreto y fue de un metro en un periodo aproximado a 100 días.



**Comparación presas Aguamilpa y El Cajón.
Niveles de agua en el terraplén. Sección máxima.**



**Fig. IV.87. Niveles de agua en el terraplén.
Sección máxima.**

IV.5.3.2. Filtraciones en la cortina.

En ambas cortinas se construyó una galería para captar y aforar las filtraciones a través del terraplén.

En Aguamilpa se aforaron gastos menores a 70 L/s durante los primeros 100 días de llenado, después de esta fecha concluyeron las lluvias y las filtraciones descendieron sin picos hasta llegar a un gasto de 3,2 L/s después de 355 días durante el estiaje; aproximadamente a 400 días de llenado comenzó la época de lluvias de 1994, los gastos y el nivel del embalse se elevaron, cuando este último rebasó la cota 205 el gasto se disparó hasta un pico de 258 L/s, este incrementó se asoció a la falta de sellado de tres barrenos de inyección en el plinto.

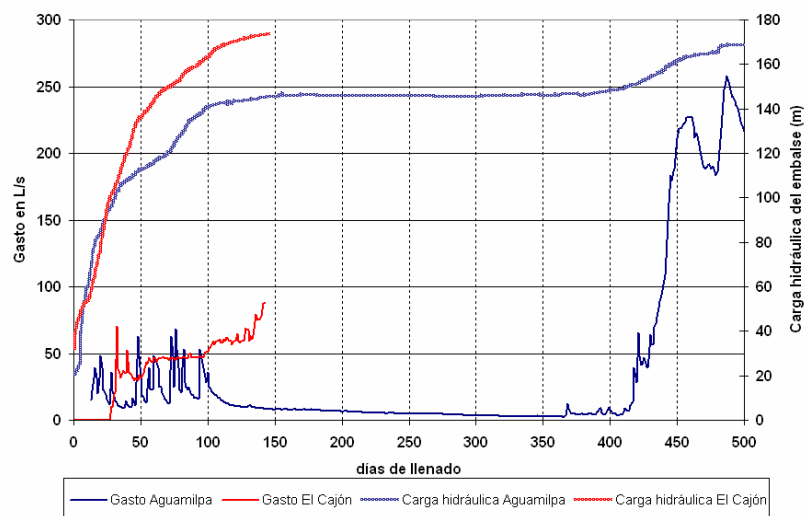
En El Cajón el gasto aumentó durante todo el llenado, incluso al final del periodo considerado en esta tesis la tendencia era de seguir incrementándose.



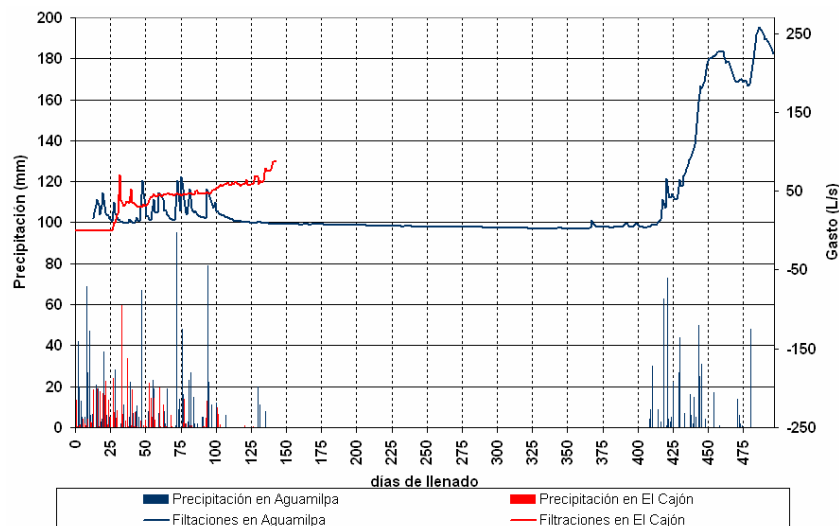
El gasto tuvo incrementos marcados en tres momentos los cuales han sido asociados a que el nivel del embalse rebasa las juntas constructivas de la losa de concreto, aunque esto aún no se ha comprobado.

Las primeras lecturas tomadas indicaban un gasto promedio de alrededor de 30 L/s con picos relacionados a las lluvias más intensas. El primer incremento fue de 32 a 47 L/s entre los días 50 y 57 de llenado, el segundo incremento se dio entre los 97 y 110 días y fue de 47 a 59 L/s y el tercer incremento inició el día 134 y a la fecha considerada para esta tesis aún no concluía, brincó de 63 a 87,3 L/s.

A pesar de la tendencia a aumentar en los gastos medidos en El Cajón estos fueron menores a los medidos en Aguamilpa.



**Fig. IV.88. Filtraciones en la cortina.
Carga hidráulica del embalse.**



**Fig. IV.89. Filtraciones en la cortina.
Precipitación.**

IV.5.4. Deformaciones en las losas de concreto.

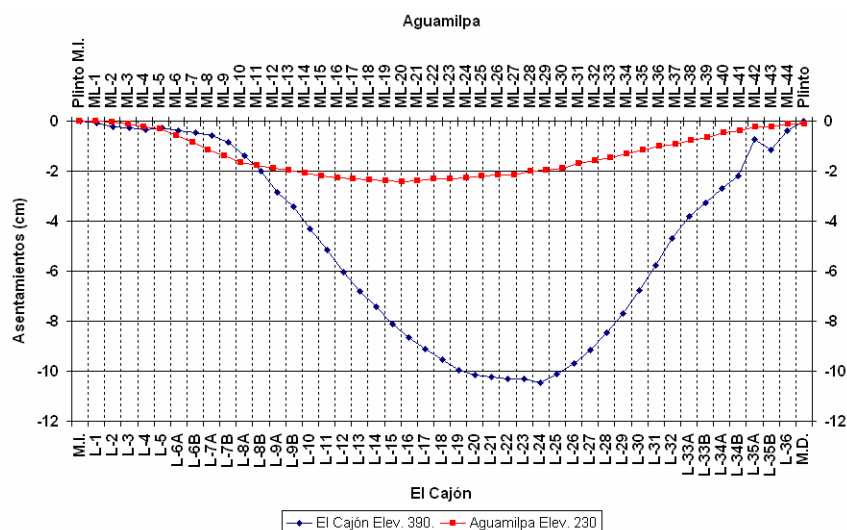
Para evaluar las deformaciones sufridas en la cara de concreto de ambas presas no se consideraron todos los aparatos instalados, únicamente los que son comparables debido a su ubicación en la cortina, los cuales son: referencias topográficas, extensómetros



tridimensionales, medidores de juntas y extensómetros unidireccionales e inclinómetros inclinados.

Se utilizaron en Aguamilpa las referencias instaladas en la línea L-1 (elev. 229) y en El Cajón la línea colocada a la elevación. 390. Ambas dispuestas en zonas cercanas a la corona.

En Aguamilpa el máximo asentamiento fue en la sección de la losa L-20 con valor de 2,4 cm, en El Cajón el mayor desplazamiento fue de 10,5 cm en la sección L-24, en ambas presas el mayor asentamiento fue en la zona central de la cortina. Los asentamientos fueron mayores en El Cajón pero se debe considerar que la fecha base de la línea L-1 de Aguamilpa fue un año después del inicio del primer llenado. En El Cajón se tomaron mediciones una semana después del inicio del llenado.



**Fig. IV.90. Asentamientos en referencias topográficas.
Corona. Cara de concreto.**

En ambas presas los desplazamientos durante el primer llenado fueron hacia aguas abajo. En Aguamilpa el mayor movimiento fue de 4,9 cm en la sección L-17, en El Cajón fue de 1,4 cm en la sección de la losa L-28.

Aunque los desplazamientos máximos de ambas presas se ubicaron en zonas centrales de la cortina en Aguamilpa fueron mayores hacia la margen izquierda y en El Cajón fueron mayores hacia margen derecha, esto obedece a las condiciones topográficas de la boquilla.

Para analizar estos movimientos también es importante considerar que para la línea L-1 de Aguamilpa se tomaron lecturas iniciales un año después de iniciado el primer llenado, aún así los valores fueron mayores que en El Cajón, esto da una idea de la diferencia en los desplazamientos horizontales sufridos por ambas presas.

En Aguamilpa la magnitud de los desplazamientos horizontales se asoció con la diferencia en los asentamientos entre los materiales que constituyen la cortina; se cree que este excesivo desplazamiento horizontal generó la doble curvatura en la deformada de la cara de concreto y a su vez agrietamiento en esta.

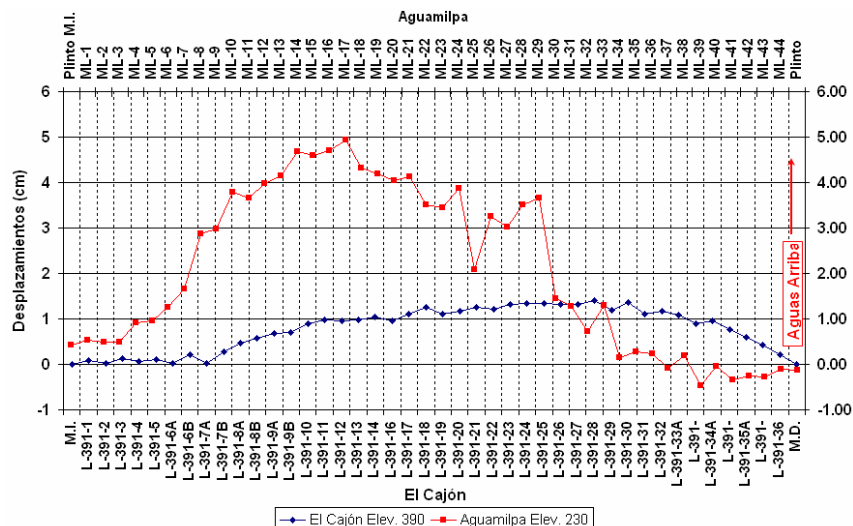


Fig. IV.91. Desplazamientos horizontales en referencias topográficas.
Eje del río. Corona. Cara de concreto.

IV.5.4.1. Desplazamientos en juntas losa-plinto.

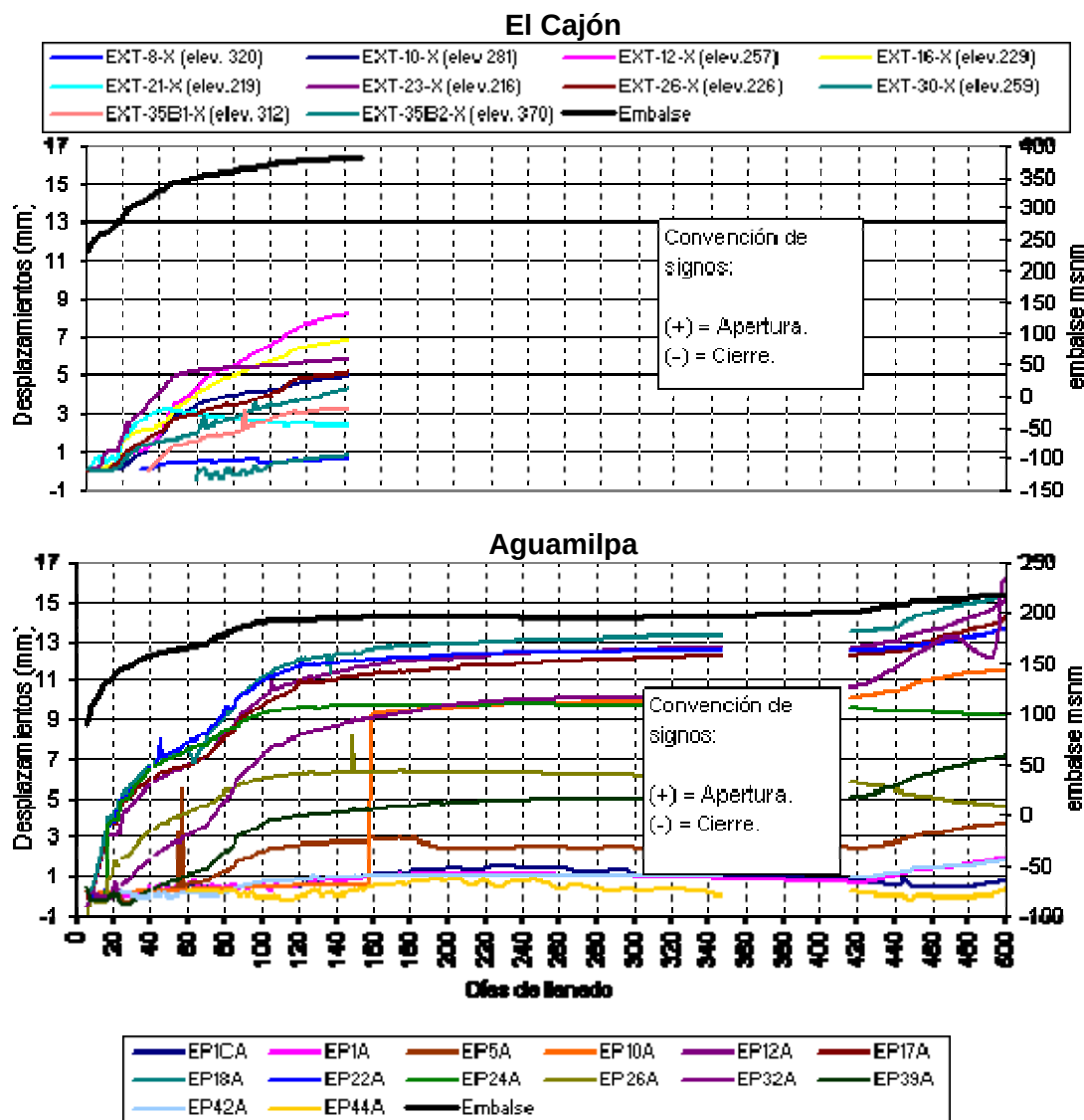
Los movimientos entre las losas de la presa y el plinto se registraron en ambas estructuras con extensómetros tridimensionales, los cuales miden desplazamientos en: apertura o cierre en la junta, desplazamiento tangencial a la losa de concreto y asentamientos o bufamientos en dirección normal a la losa.

En los movimientos de apertura o cierre de la junta en ambas presas se midieron desplazamientos de apertura, en Aguamilpa el valor máximo fue de 15,3 mm en la sección L-18, en El Cajón fue de 8,2 mm en la sección L-12.

En Aguamilpa el mayor desplazamiento fue al centro de la cortina lo que es congruente si se considera que la losa L-18 es la que está sujeta a una mayor carga hidráulica, en El Cajón se nota mayor apertura en las losas de la margen izquierda.



**Comparación Aguamilpa y El Cajón.
Desplazamientos en Extensómetros tridimensionales.
Apertura y cierre de la junta losa-plinto.**

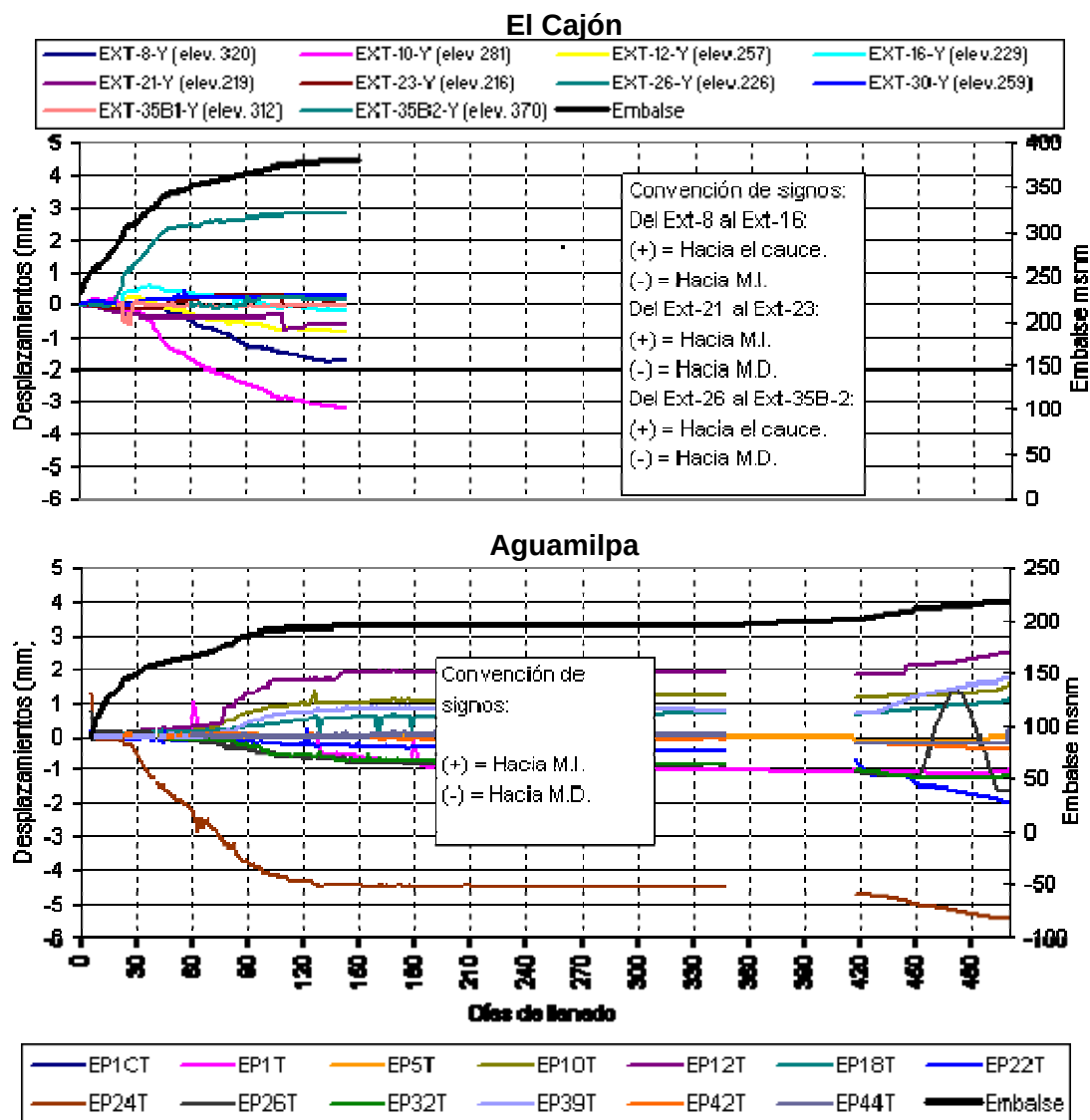


**Fig. IV.92. Movimientos de apertura o cierre de la junta losa-plinto.
Extensómetros tridimensionales.**

En dirección tangente a la losa de concreto se midieron desplazamientos máximos en Aguamilpa de 5,4 mm hacia margen derecha en la losa L-24, las lecturas no reflejan una tendencia clara de movimiento de toda la cara de concreto, pero los demás aparatos registraron mediciones inferiores a 2,5 mm. En El Cajón el mayor desplazamiento fue de 3,3 mm hacia margen izquierda en la sección L-10, los extensómetros indicaron movimientos de las losas hacia las márgenes.



**Comparación Aguamilpa y El Cajón.
Desplazamientos en Extensómetros tridimensionales.
Apertura y cierre de la junta losa-plinto.**



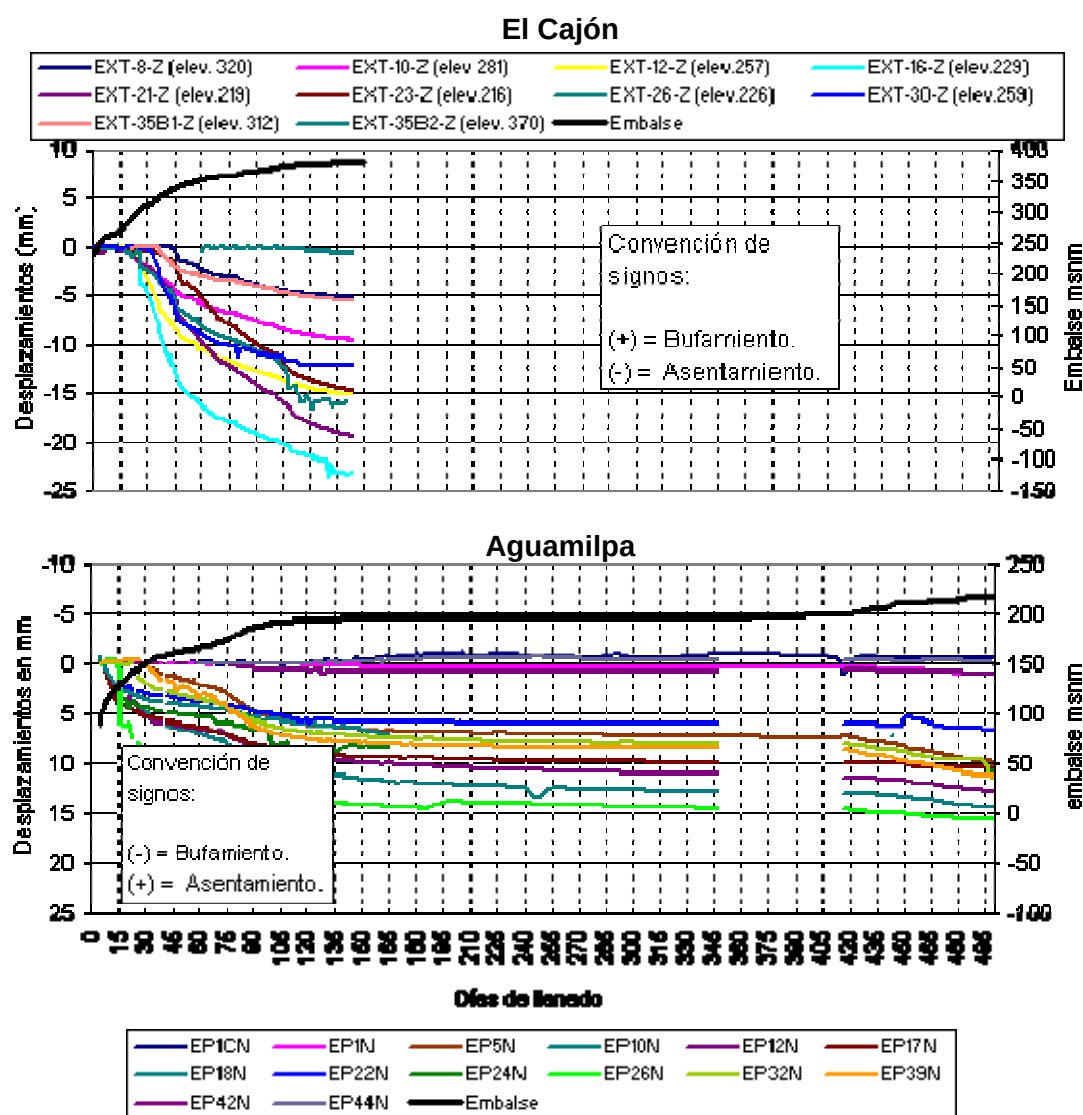
**Fig. IV.93. Movimientos tangentes a la junta losa-plinto.
Extensómetros tridimensionales.**

Los movimientos en dirección normal a las losas de concreto indicaron en Aguamilpa asentamientos a excepción de los aparatos instalados en las losas de los extremos que marcaron bufamientos menores a 1 mm, el máximo desplazamiento fue de 15,62 mm en la sección L-26 ubicada al centro del cauce, en general, se midieron asentamientos mayores en la margen izquierda.

En El Cajón todos los movimientos fueron de asentamientos con valor máximo de 23,2 mm en la sección de la losa L-16 ubicada entre el cauce y la margen izquierda, los mayores asentamientos se midieron en las losas centrales y las de margen izquierda.



**Comparación Aguamilpa y El Cajón.
Desplazamientos en Extensómetros tridimensionales.
Asentamientos y bufamientos de la junta losa-plinto.**



**Fig. IV.94. Movimientos normales a la junta losa-plinto.
Extensómetros tridimensionales.**

IV.5.4.2. Desplazamientos en juntas verticales losa-losa.

Los desplazamientos entre juntas verticales que se pueden comparar entre estas dos presas son los medidos en las losas de tensión ubicadas en zonas cercanas a las márgenes.

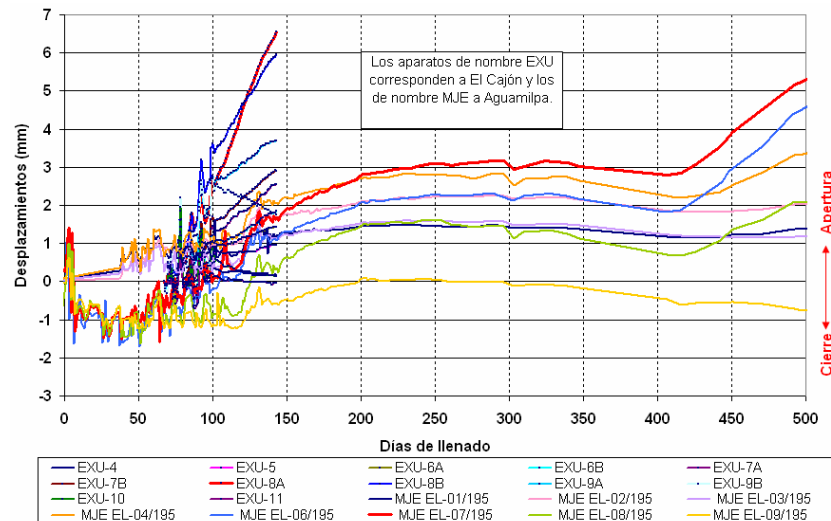
En Aguamilpa se instalaron medidores de junta eléctricos a la elev. 195: nueve en la margen izquierda de la losa L-1 a la L-10 y ocho en margen derecha de la losa L-34 a L-42. En El Cajón se instalaron extensómetros unidireccionales a la elevación 370: doce en la margen izquierda de la losa L-4 a la L-11 y ocho en margen derecha de la losa L-30 a L-35A.



Al ser losas de tensión el movimiento esperado en estas juntas es la apertura, en la margen izquierda de Aguamilpa esto no sucedió para la junta entre las losas L-9 y L-10 con 0,7 mm de cierre, las demás juntas mostraron apertura al final del primer llenado, el valor máximo fue en la junta de las losas L-7 y L-8 con 5,3 mm.

En la margen izquierda de El Cajón también se midió desplazamiento de cierre en una junta aunque de valor mínimo (0,05 mm) ubicada entre las losas L-11 y L-12, las demás juntas sufrieron aperturas y el máximo desplazamiento fue de 6,6 mm entre las losas L-8 y L-8A.

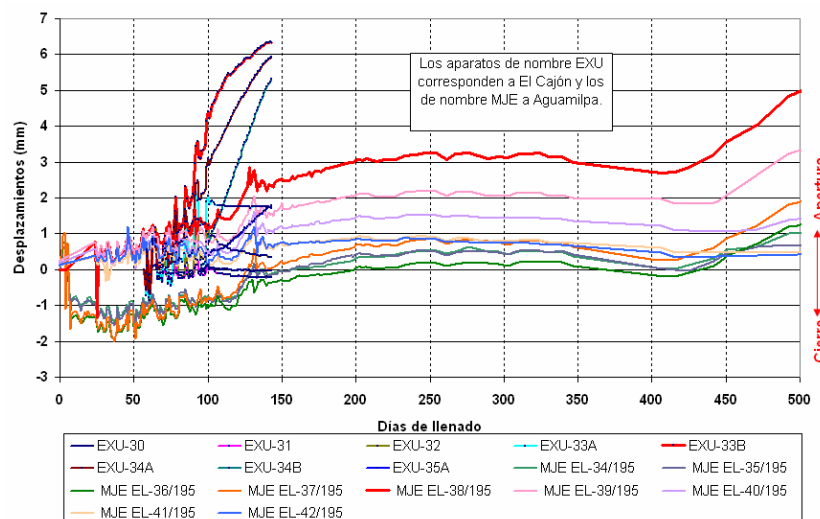
En las siguientes figuras los aparatos instalados en El Cajón se muestran con marcador azul y las mediciones concluyen varios días antes que en Aguamilpa.



**Fig. IV.95. Desplazamientos en losas de tensión.
Juntas verticales losa-losa. Margen izquierda.**

En la margen derecha de Aguamilpa los desplazamientos fueron de apertura en todas las losas instrumentadas a la cota 195, el valor máximo fue de 4,9 mm entre las losas L-38 y L-39.

En El Cajón se midieron desplazamientos de cierre en las juntas más cercanas a las zonas de compresión (centrales) pero con valores bajos de alrededor 0,2 mm, las demás juntas manifestaron movimientos de apertura con el máximo de 6,3 mm entre las losas L-33B y L-34A.



**Fig. IV.96. Desplazamientos en losas de tensión.
Juntas verticales losa-losa. Margen derecha.**



Los movimientos de las losas más cercanas a las márgenes fueron de apertura en general, a pesar de haber tenido un periodo menor de llenado El Cajón tuvo desplazamientos de aproximadamente 1mm más que Aguamilpa en ambas márgenes.

Los desplazamientos normales a la cara de concreto se midieron en ambas presas con inclinómetros inclinados, los cuales también sirven para conocer la geometría de la deformada de la cara de concreto en una sección dada.

Para esta comparación únicamente se tomaron en cuenta los inclinómetros instalados en la sección máxima de cada presa.

En Aguamilpa se utilizó el aparato IL-18 (sección L-18), la deformada la losa de concreto mostró doble curvatura, el máximo desplazamiento se midió en la boquilla del inclinómetro y fue de 14,3 cm.

En El Cajón se utilizó el inclinómetro IL-21 (sección L-21), la deformada fue una sola curvatura, y el máximo desplazamiento al final del llenado fue de 6,0 cm a la altura media de la sección.

En la siguiente gráfica es fácil apreciar la gran diferencia en las deformadas, en Aguamilpa los desplazamientos horizontales fueron excesivos lo cual se refleja en la losa de concreto y en sus grandes desplazamientos normales.

La doble curvatura de la cara de concreto en Aguamilpa originó agrietamientos en las losas y filtraciones, lo anterior se consideró en el diseño de la cortina de El Cajón y se procuró tener una sola curvatura en la deformada de su losa, no obstante que en la sección máxima si se logró dicho objetivo en las otras dos secciones instrumentadas no fue así como se mostró en capítulos anteriores.

En la figura IV.97 se percibe que en la parte superior de la sección L-21 se comienza a desarrollar otra curvatura, a lo que se le debe dar seguimiento para evitar filtraciones en caso de agrietamientos o en corregirlas si se da su ocurrencia.

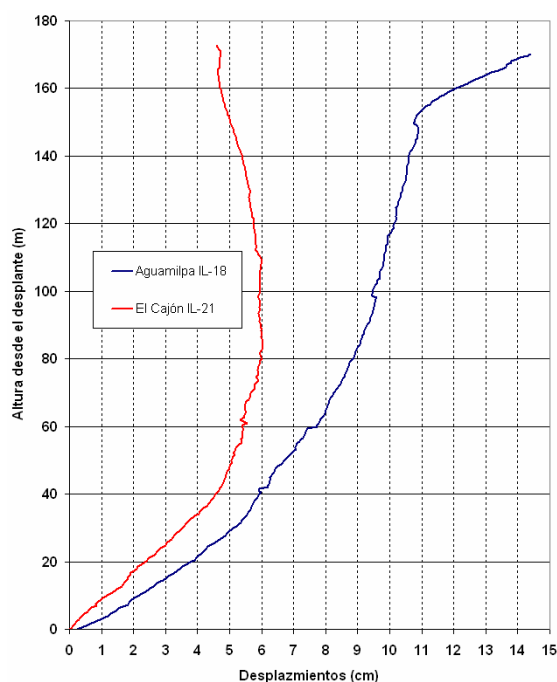


Fig. IV.97. Desplazamientos normales a las losas de concreto. Inclinómetros inclinados. Sección máxima.



V. CONCLUSIONES.

El diseño de las presas de enrocamiento con cara de concreto (CFRD) está basado en la experiencia, la cortina de la presa El Cajón fue diseñada con el antecedente de Aguamilpa, la cual tiene características muy similares; por ser una presa de enrocamiento con cara de concreto también, en la geometría de la cortina y en la geometría del cauce.

El principal problema que presentó Aguamilpa después del primer llenado fueron las grandes filtraciones a través del terraplén, la causa de que el gasto filtrado fuera grande se debió a una serie de hechos: el primer factor desencadenante fue la diferencia en la magnitud de los asentamientos en los materiales que constituyen la cortina, en particular el hecho de que el material 3C tuviera deformaciones aproximadamente tres veces mayores que el material 3B.

La diferencia tan grande en los asentamientos generó que los desplazamientos horizontales en la corona de la cortina fueran grandes también, del orden de 40 cm al final del llenado, y a su vez esto propició un cambio en la geometría de la deformada de la cara de concreto: en la parte inferior a la cota 200, la cara de concreto presentó una curvatura reflejando el empuje de la carga hidráulica debida al embalse; en la zona superior a esta cota, la losa presentó otra curvatura diferente, está debida a los grandes desplazamientos horizontales en la corona.

En la losa de concreto se generaron agrietamientos que se asociaron a la doble curvatura de la deformada de ésta, la mayor aportación al gasto que se aforó en la galería ubicada al pie de la cortina fue debido a las filtraciones que pasaron por dichas grietas.

Por lo anterior, uno de los objetivos primordiales en el diseño de El Cajón fue tratar de evitar el fenómeno anteriormente descrito, para lo cual se tomaron múltiples medidas como:

- Cambiar la inclinación de la frontera entre los materiales 3B y T, para disminuir los esfuerzos cortantes que se generaron en Aguamilpa entre estos dos materiales y disminuir también la diferencia en sus asentamientos y la doble curvatura en la deformada de la cara de concreto.
- Utilizar materiales para el enrocamiento que constituye el terraplén (3B, T y 3C) con características similares en cuanto a deformabilidad; con esta medida aunque se permiten mayores asentamientos en el material 3B, estos son tolerables y no difieren en mucho a los de los otros materiales.

En la presa El Cajón se presentaron otras innovaciones en la construcción además de las del diseño como: agregar agua con gasto de 200 L/s durante la compactación del terraplén lo que disminuyó la deformabilidad de los materiales y, aumentar el espesor de capa de los materiales compactados lo que tuvo un impacto importante en los costos de construcción.

Durante la etapa de construcción el comportamiento del terraplén fue adecuado, sus mayores asentamientos se presentaron en la altura media del terraplén, en la sección máxima y en la zona de mayor altura, es decir, en el material T donde tuvieron el valor de 87,3 cm medido en NHA.

Los desplazamientos horizontales en el eje de la cortina fueron menores a 15 cm y hacia el centro del terraplén, sus mayores valores se presentaron en las zonas de mayor altura de la presa. Los desplazamientos en el eje del río fueron máximos al centro de la cortina, en el material 3C, hacia aguas abajo y, de 22,6 cm.



Los módulos de deformación calculados al final de la etapa de construcción indicaron que el material menos deformable sería el T, y el de mayor deformabilidad sería el 3C. El único cálculo que entregó resultados diferentes fue el hecho con las lecturas de los grupos de celdas de presión y extensómetros, sin embargo, los resultados de este análisis se debe tomar con cierta reserva ya que el grupo G-2 muestra que en esta zona del terraplén es posible que se presente el fenómeno de arqueo.

Los niveles de agua dentro del terraplén durante la construcción fueron mínimos y se vieron regidos por el gasto utilizado durante la compactación del terraplén y el uso de drenes colocados en la cara de concreto.

En la cara de concreto se presentaron asentamientos máximos en la zona central de la losa y fueron del orden de 20 cm, los desplazamientos horizontales en el eje del río fueron hacia aguas abajo en la zona superior de la losa con 2,6 cm y hacia aguas arriba en la parte inferior con 1,3 cm. En el eje de la cortina la cara de concreto sufrió desplazamientos hacia el centro del terraplén menores a 2,5 cm.

Durante este periodo únicamente se midieron los desplazamientos en las juntas losa-plinto, las cuales tuvieron el siguiente comportamiento:

- Cierre de las juntas con valores máximos en las losas centrales, mayor abertura de 3,1 mm.
- Deslizamientos de las juntas hacia el centro del cauce con el máximo desplazamiento de 3,5 mm en margen izquierda.
- Asentamientos mayores en las losas centrales con valores pequeños (máximo de 0,7 mm).

Los inclinómetros inclinados mostraron durante la última etapa de colado de la losa un comportamiento similar al de la referencias topográficas, en este caso los desplazamientos marcan hundimientos en la parte inferior de la losa con máximo de 2,0 cm en la sección L-21 y asentamientos en la parte superior de la losa con máximo de 8,6 cm en la sección L-16 (margen izquierda).

Los desplazamientos del terraplén durante la construcción marcaron que este tendió al asentamiento, siendo mayor en la zona de mayor altura de la cortina, los desplazamientos horizontales fueron hacia el centro del terraplén en el eje de la cortina, hacia aguas arriba en la zona la cara de concreto y hacia aguas abajo en la zona del enrocamiento 3C.

Los módulos de deformación indicaron que el material menos deformable durante construcción fue el T, la diferencia entre los módulos obtenidos en cada material fue menor al doble en los casos más desfavorables (entre el material T y 3C), por lo que se esperaban deformaciones similares en los tres materiales que constituyen el enrocamiento de la cortina durante el periodo del primer llenado.

El llenado se llevó a cabo en un lapso relativamente corto, ya que duro alrededor de medio año, los estudios hidrológicos realizados con anterioridad demuestran que el 2006 fue un año medio para la cuenca que abastece el vaso de El Cajón, la velocidad del llenado también se vio influenciada por el volumen del vaso que es pequeño en comparación al de otras presas, en particular, es aproximadamente una tercera parte del volumen del vaso de Aguamilpa.

Los asentamientos durante el llenado reflejan la velocidad de llenado, es claro observar en las gráficas presentadas en este trabajo que el único material que se vio afectado por la carga hidráulica del embalse fue el 3B, que constituye el respaldo de la cara de concreto.



También es posible observar a través de las lecturas tomadas en NHA que el efecto propio del embalse comenzó a manifestarse alrededor de medio mes después de iniciado el llenado.

Los mayores asentamientos durante el llenado fueron en la zona más cercana a la cara de concreto (material 3B) y a la altura media del terraplén con valor de 19,2 cm; sin embargo, sumando estos asentamientos con los ocurridos durante construcción aún se tiene que es el material T el de mayores asentamientos con 93,3 cm al final del llenado.

En todos los aparatos con los que se midieron asentamientos se presentaron que las mayores deformaciones ocurrieron al centro del terraplén, un caso particular es el del inclinómetro I-1 en donde se midió 11,5 cm de asentamiento en la parte superior del tubo.

En el enrocamiento los asentamientos fueron menores respecto a los medidos en otras zonas de la presa con los máximos valores medidos de 10,6 cm en la parte superior del terraplén.

El inclinómetro I-1 está ubicado sobre el material T y las referencias topográficas reflejan los asentamientos del material 3C; si comparamos los valores máximos medidos en ambas zonas podemos decir que las deformaciones de estos materiales no fueron muy diferentes, y este fue uno de los objetivos de diseño con la intención de no permitir desplazamientos horizontales grandes.

Dentro del terraplén los máximos desplazamientos horizontales en el eje del río fueron a la altura media de la presa en el centro del terraplén hacia aguas abajo; su valor máximo fue de 5,5 cm; por su parte en el enrocamiento aguas abajo el máximo desplazamiento fue de 4,1 cm también hacia aguas abajo.

El terraplén tuvo la tendencia de movimiento hacia la zona central de la cortina con desplazamientos inferiores a 3,0 cm; sin embargo, en el enrocamiento aguas abajo en las elevaciones inferiores las lecturas de las referencias topográficas indicaron que esta zona tiende a desplazarse hacia las márgenes, este movimiento fue de magnitudes pequeñas (menores a 5,0 cm).

Los módulos de deformación demostraron que durante el periodo del primer llenado el material más deformable fue el 3B, lo que refleja las deformaciones en esta etapa. En los módulos calculados con las mediciones de los grupos de celdas y extensómetros fue posible notar que en la zona central del terraplén se desarrolla el fenómeno de arqueado, el cual consiste en un desarrollo de esfuerzos cortantes entre el material del enrocamiento y la roca de las laderas, esto altera el estado de esfuerzos dentro de la presa.

En general, los movimientos del terraplén fueron hacia aguas abajo y hacia el centro de la cortina sus desplazamientos fueron de magnitudes pequeñas, cumpliendo con otro de los objetivos del diseño, los asentamientos se vieron incrementados únicamente en el material 3B con valores tolerables, estos, son máximos en la zona central de la cortina, en particular en la sección máxima.

Los niveles de agua en el terraplén fueron regidos por la cota de la galería al pie de la cortina, los aparatos que tuvieron lecturas en este periodo tuvieron un comportamiento como el del embalse, los máximos niveles de agua fueron medidos sobre la sección L-21, la cual al estar sobre el cauce natural funge como dren dentro del terraplén y es la salida del gasto.

Las filtraciones durante el llenado tuvieron valores aceptables, su comportamiento mostró periodos constantes y aumentos súbitos en el gasto en fechas muy marcadas, aunque al final del llenado aún no se conocía con seguridad la razón de este comportamiento, la teoría



más aceptada fue que se debía a que las filtraciones aumentaban cada vez que el embalse rebasaba la cota de las juntas constructivas de las losas de concreto.

A pesar de los incrementos súbitos del gasto filtrado a través del terraplén su magnitud no es factor de riesgo para la presa, pero si es debido darle un seguimiento constante para poder identificar las causas de un probable aumento que signifique cambios importantes en el funcionamiento general de la Central Hidroeléctrica.

Con las líneas de referencias topográficas instaladas en el parapeto es posible evaluar la pérdida del bordo libre de la cortina, los asentamientos máximos fueron al centro del terraplén, la mayor pérdida de bordo libre durante el primer llenado fue de 10,5 cm, valor inferior al esperado en el diseño que fue de 55 cm, incluyendo las deformaciones posteriores al llenado, como en presas las mayores deformaciones de la cortina se presentan durante esta etapa, no se esperan grandes asentamientos a futuro.

Las juntas losa-plinto tuvieron un comportamiento adecuado los mayores desplazamientos medidos fueron asentamientos en la dirección normal a la cara de concreto con valores de 23,2 mm; los filtros de las juntas fueron diseñados para una abertura máxima de la junta de 15 cm por lo que el comportamiento durante el llenado fue favorable y no se esperan aumentos que superen dicha cantidad.

Durante el llenado no fue posible tomar lecturas suficientes de las juntas losa-parapeto que demostrarán el comportamiento de este; los valores aún eran pequeños al final del llenado pero, si es posible decir que la tendencia es de asentamientos y aperturas.

Las losas de la zona de compresiones (parte central de la cara de concreto), en general, sufrieron cierres entre ellas con valores menores a 0,2 mm que son valores muy satisfactorios, pero, entre las losas L-21 y L-22 se registró una apertura de poco más de 8 mm, a lo que se le deberá dar seguimiento dado que podría ser la fuente de futuras filtraciones en el terraplén.

Las losas más cercanas a las márgenes trabajaron a tensión lo cual se puede comprobar con los desplazamientos medidos en esta zona que indican aperturas en las juntas, sus desplazamientos tuvieron valores máximos de 6,55 mm los cuales son tolerables considerando que el máximo permisible es de 15 cm.

La tendencia de las losas centrales en la parte superior de la cara de concreto fue de aperturas, aunque en realidad, estos valores son muy inferiores a los de las losas de tensión, dado que no rebasan el milímetro.

Otro de los aspectos importantes considerados en el diseño fue la geometría de la deformada de la cara de concreto, para conocerla se instalaron tres inclinómetros inclinados en las secciones L-16, L-21 y L-26; el diseño final concluyó que en la sección máxima no se desarrollaría doble curvatura en la deformada de la losa.

En las secciones más cercanas a las márgenes si se desarrolló la doble curvatura, aunque su valor es inferior al presentado en Aguamilpa se le deberá dar seguimiento para conocer si en algún momento se generan grietas que permitan grandes filtraciones en el terraplén.

En la sección máxima como se predijo en el diseño se presenta una sola curvatura, pero, en las últimas mediciones hacia el final del llenado se nota que se comienza a formar otra curvatura en la zona superior de la cortina, sus valores son mínimos pero también se le deberá dar seguimiento.

En la siguiente tabla se compararán las deformaciones esperadas en el diseño de la cortina de El Cajón durante su operación con las cifras medidas al final del llenado.



Tabla V.1. Deformaciones esperadas de la cortina de El Cajón vs. Deformaciones al final del primer llenado.

	Desplazamiento horizontal en la losa superior (cm)	Asentamiento normal a la cara de concreto máximo (cm)	Pérdida de bordo libre (cm)
Diseño	2	29	55
Medidas al final del llenado	4,61	6,04	10,50

Las deformaciones al final del llenado resultan satisfactorias comparadas con las de diseño a excepción del desplazamiento de la losa superior de la cara de concreto, esta diferencia está influenciada por lo que parece ser el inicio de la doble curvatura en la deformada de la cortina.

En este trabajo se realizó una comparación entre el comportamiento de las presas Aguamilpa y El Cajón durante el primer llenado, la primer diferencia considerada en este análisis fue la velocidad y la duración del llenado, en donde El Cajón se ve favorecido por haber estado menor tiempo expuesto a las cargas debidas al llenado; sin embargo, fue mayor la velocidad con que estas cargas aumentaron.

Las deformaciones en El Cajón fueron menores que en Aguamilpa, los materiales que sufrieron mayor asentamiento fueron el T y el 3C de Aguamilpa, en este análisis se observó que la diferencia de asentamientos entre los materiales que constituyen el enrocamiento de Aguamilpa es grande, prueba de esto fue que el material que menos se deformó entre todos los analizados fue el 3B de Aguamilpa, lo que indica que los materiales de la cortina de El Cajón sufrieron asentamientos más uniformes.

Sobre el eje de la cortina en la sección máxima se presentaron asentamientos del material 3B de Aguamilpa mayores al material T de El Cajón, aunque este último es más deformable; estos resultados demuestran que la duración del llenado fue un factor determinante en la magnitud de las deformaciones en ambas presas.

En el enrocamiento aguas abajo también fueron mayores los asentamientos sufridos en Aguamilpa; pero, en la pérdida del bordo libre es posible notar que los materiales de la cortina de El Cajón son más deformables que los de la de Aguamilpa, ya que en la primera se midió un asentamiento de 10,6 cm después de poco más de 5 meses mientras que en Aguamilpa se midieron 7,7 cm de pérdida de bordo libre durante 10 meses del llenado.

Los desplazamientos horizontales fueron mayores en Aguamilpa tanto sobre el eje del río como sobre el eje de la cortina, tanto en inclinómetros como en referencias topográficas; esta fue una de las deformaciones a las que se les dio especial seguimiento por las implicaciones que tuvieron en Aguamilpa los grandes desplazamientos sobre el eje del río.

Los cálculos de los módulos de deformación demostraron que el material menos deformable del análisis fue el 3B de Aguamilpa, y el más deformable fue el 3C de la misma presa.

Los niveles de agua dentro del terraplén de ambas presas tuvieron un comportamiento muy similar, en donde ambas sufrieron incrementos no mayores a 7 m durante todo el periodo del llenado.

Las filtraciones a través del terraplén fueron mucho menores en El Cajón, no obstante, como se explicó anteriormente es conveniente dar seguimiento a los gastos filtrados en la cortina de El Cajón.



En la junta losa-plinto los desplazamientos fueron mayores en Aguamilpa, a excepción de la dirección Z en donde los asentamientos de El Cajón fueron superiores; en todos los casos las deformaciones no rebasaron 0,3 mm.

En las juntas de tensión comparadas en este trabajo se midieron mayores aberturas en la cara de concreto de El Cajón, sin embargo, los valores fueron menores a 0,7 mm y no significan un riesgo para la presa.

El principal problema del comportamiento de Aguamilpa durante su operación hasta ahora han sido las grandes filtraciones que llegó a presentar debido a agrietamientos en la cara de concreto, su génesis se asoció a la doble curvatura que desarrolló la cara de concreto.

La comparación realizada en esta tesis consideró las secciones máximas de cada presa, en las cuales se puede observar que las deformaciones fueron mayores en Aguamilpa al superar en poco más de ocho centímetros el desplazamiento máximo en dirección normal de la presa El Cajón.

No obstante lo anterior, la diferencia de mayor importancia entre los comportamientos de las caras de concreto es precisamente la geometría de la deformada de estas, en donde Aguamilpa presentó claramente doble curvatura y grandes desplazamientos horizontales de la losa superior, mientras El Cajón presentó una sola curvatura y sus desplazamientos horizontales fueron menores, aunque es necesario darle el seguimiento adecuado a estas deformaciones para prevenir agrietamientos en la losa.

En conclusión podemos afirmar que las deformaciones de la presa El Cajón fueron adecuadas y normales para una presa de su tipo, las consideraciones tomadas durante el diseño se han cumplido hasta el final del primer llenado y las deformaciones futuras deberán ser de magnitudes pequeñas dado que El Cajón ha pasado su etapa más crítica en el comportamiento.

Es importante darle seguimiento a las filtraciones en el terraplén y a las deformaciones de las losas de concreto, en especial a la geometría de estas para prevenir posibles agrietamientos.

El diseño de El Cajón ha sido un éxito de la ingeniería mexicana y, como lo fue Aguamilpa en su momento El Cajón formará un ejemplo adecuado para los diseños de presas futuras del tipo de Enrocamiento con Cara de Concreto, además de que los cambios hechos durante la construcción de la cortina podrían emplearse en proyectos futuros como son La Yesca y La Parota obteniendo beneficios económicos en esta etapa.



REFERENCIAS.

1. Alberro A. Jesús. Carta al Ing. Mena Sandoval referente al comportamiento de la presa El Gallo, Gro. 1998.
2. Alemán, Juan de Dios. P. H. El Cajón, Nay. Diseño Geotécnico de la Cortina. Estudio de materiales de enrocamiento y propuesta de zonificación de presa. SGM-CFE. México. 2002.
3. Barrios Galván Ma. Gpe. C. H. Aguamilpa, Nay. Informe de comportamiento hasta 2005. Comisión Federal de Electricidad. Mayo de 2006.
4. Base de datos SISE. Subgerencia de Seguridad de Estructuras. Comisión Federal de Electricidad.
5. C. Lara B., F. Ramírez R. Instrumentación del cuerpo y cara de concreto en obras de contención P. H. Aguamilpa, Nayarit. CFE.
6. Castro Abonce J. Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa. Homenaje al profesor Raúl J. Marsal. Datos de Diseño. Comisión Federal de Electricidad. 1991.
7. Chávez Ramírez, Luis E. Proyecto Hidroeléctrico de El Cajón, Nay. Séptimo Informe del Comportamiento. SSE-CFE. Octubre de 2006.
8. Demeneghi Colina, Agustín. Apuntes de Mecánica del Medio Continuo, UNAM. FI.
9. Fell, R. McGregor, P. Stapledon, D., Bell, Graeme. Geotechnical Engineering of Dams.
10. Folleto final El Cajón. CFE. México. 2005.
11. Fuentes Nava, Javier. Memorias del Seminario de Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto. Presentación "Sellos en Presas con Cara de Concreto. Aguamilpa, El Cajón y La Yesca, México". 2006.
12. Hernández Verde, Eduardo. Tesis "Proyecto Hidroeléctrico El Cajón sobre el río Santiago, Nayarit".
13. Macedo Gómez, Gabriel. Artículo "Experiencias en Presas con Cara de Enrocamiento. Memorias del Seminario de Seguridad de Presas. México. 2002.
14. MENA y Col. P. H. el Cajón, Nay. Proyecto de instrumentación, revisión 4. SCE-CFE. México 2003.
15. P. H. El Cajón. Informe de instrumentación al 4 de diciembre de 2006. CECSA. México, 2006.
16. P. H. El Cajón. Informe de instrumentación al 7 de julio de 2006. CECSA. México, 2006.
17. Presentación. Evolución de Niveles en el Embalse para diferentes Fechas de Cierre. CFE. Mex.
18. Rodea Osorio Alejandro. Tesis "Construcción de la cortinas de materiales graduados con cara de concreto del P. H. Aguamilpa, Nay". 1994.



19. Romo, Miguel P. Memorias del Seminario de Presas de Enrocamiento con Cara de Concreto, Caso: El Cajón. Diseño de la cortina. México. 2006.
20. Torres Bonilla, Erick. P. H. El Cajón, Nay. Noveno informe de comportamiento, etapa de primer llenado, SSE-CFE, México, 2006.