

01163
2es.
4

COMPORTAMIENTO DE LA PRESA PEÑITAS

GABRIEL MACEDO GOMEZ

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA DE SUELOS)

CIUDAD UNIVERSITARIA OCTUBRE DE 1989

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	2
2.a Geología	3
2.b Sismicidad	4
2.c Materiales disponibles	5
3. DISEÑO	8
3.a Cimentación	8
3.b Pantalla impermeable	10
3.c Cortina	11
4. CONSTRUCCION	14
4.a Historia de la construcción	14
4.b Especificaciones de colocación de materiales	15
4.c Control de materiales	18
5. INSTRUMENTACION	22
5.a Instrumentación en el cuerpo de la cortina	22
5.b Localización de los instrumentos	25
6. COMPORTAMIENTO	28
6.a Eficiencia de la pantalla	29
6.b Relaciones esfuerzo-deformación de los materiales <i>in situ</i> , pruebas de placa y análisis con el M.E.F.	32
6.c Desplazamientos	39
6.d Interacción corazón-pantalla y corazón-filtro	43
6.e Zonas de plastificación	44
6.f Piezometría en el corazón	48
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
8. REFERENCIAS	52
TABLAS	
FIGURAS	

1. INTRODUCCION

Este trabajo presenta el comportamiento de la presa Peñitas deducido a partir de los registros obtenidos de la instrumentación instalada en dicha estructura. Se analiza la información obtenida durante la construcción y primer llenado de la presa para evaluar el comportamiento de los elementos que la forma, las variaciones con el tiempo de las propiedades mecánicas de los materiales de construcción de la misma, la magnitud, la distribución y el sentido de los movimientos, el nivel y trayectoria de los esfuerzos, el funcionamiento hidráulico y el fenómeno de interacción entre constituyentes de la cortina.

Se desarrolla este trabajo de investigación con el fin de integrar las experiencias adquiridas en el diseño y construcción de la presa, y enfatizar la importancia del uso de la instrumentación en presas, para evaluar diferencias entre el comportamiento medido en campo y el deducido con la aplicación de herramientas de análisis existentes en Geotecnia.

2. ANTECEDENTES

El proyecto hidroeléctrico Peñitas se encuentra localizado en el estado de Chiapas sobre el río Grijalva a 78 km aguas abajo de la presa Netzahualcóyotl (Malpaso), que regula el nivel de aguas máximo extraordinario, NAME. La finalidad de este proyecto es el de aprovechar el último desnivel importante antes de la desembocadura del río en el Golfo de México.

La cortina es una estructura de tierra y enrocamientos de 43 m de altura y una longitud de corona de 720 m, con taludes 2 a 1 (horizontal a vertical). El volumen total es de 2.5×10^6 m³, con corazón impermeable central de 250000 m³ y una pantalla plástica en el material de cimentación; el embalse almacenará un total de 1500×10^6 m³ de agua. La planta generadora tiene una potencia instalada de 426 MW y cuenta con un vertedor de excedencias con capacidad de 18700 m³/s (fig 2.1).

El proyecto se empezó a contruir en noviembre de 1979. La construcción de la cortina se realizó en el periodo comprendido entre mayo de 1984 y septiembre de 1986.

2a. Geología

El sitio de Peñitas se ubica sobre el flanco norte de la Sierra de Chiapas, donde las formaciones que afloran son primordialmente lutitas y areniscas del terciario, cubiertas en algunas zonas por suelos residuales y depósitos aluviales del cuaternario. Estas formaciones presentan plegamientos con orientación NW-SE.

Existen dos estructuras geológicas principales, el sinclinal de Maspac cuyo eje pasa muy cerca del sitio de la boquilla (fig 2.2) y el anticlinal Mono Pelado, con rumbo sensiblemente paralelo a la estructura anterior y longitud aproximada de 15 km.

La zona de Peñitas está afectada localmente por el volcán activo El Chichonal, que hizo erupción en marzo de 1982 cubriendo la zona con lluvia de arena ; el volcán se ubica aproximadamente a una distancia de 20 km al sureste de la boquilla.

La boquilla se originó por la erosión diferencial de la roca y en ambas márgenes de la boquilla afloran areniscas, con intercalaciones de lutita, sobre todo en la proximidad del contacto con las lutitas que la subyacen (fig 2.3).

En casi toda la zona, las areniscas están cubiertas por arcillas residuales lateríticas de poco espesor. En la

boquilla el río se divide en dos brazos que bordean un amplio playón triangular de materiales aluviales (fig 2.3a).

En general, los estratos de roca en la boquilla tienen rumbo NE con echados de 6° a 10° hacia el NW, es decir, de margen derecha a margen izquierda.

La boquilla está afectada por tres sistemas de fracturas:

a) El sistema α con rumbo N-S, paralelo al cantil de la margen izquierda y que tiene relación con el origen de ese escarpado.

b) El sistema β con rumbo E-W, paralelo al cantil de la margen derecha y que está también relacionado con su origen.

c) El sistema γ con dirección NW-SE, que dió origen a la ruta del cauce del río. Esta es la familia menos frecuente.

Las dos primeras familias constituyen un grupo de fallas transcurrentes, por lo que son esencialmente verticales. La tercera familia tiene inclinaciones que varían de 70° NW a 70° SE; estas fracturas son de extensión y paralelas a la dirección del esfuerzo principal mayor de compresión (ref 10).

2b. Sismicidad

La actividad tectónica en la región tuvo sus últimos movimientos de importancia a principios del terciario, dando origen a los plegamientos del Mono Pelado y Maspac. Aparte de estas estructuras sólo se tienen plegamientos de carácter local. Hace unos 100000 años ocurrió el nacimiento del volcán El Chichonal, actualmente activo, generador de muchos sismos locales poco antes de su erupción en marzo de 1982; todos ellos de menos de 20 km de profundidad focal; el evento de mayor importancia fue de magnitud 4 en la escala de Richter.

La carta sísmica de Chiapas (fig 2.4) muestra que toda la superficie del estado se encuentra bajo la influencia de focos activos continentales y submarinos donde no solo se han generado movimientos débiles o fuertes, sino macrosismos que, con base en la escala de Richter, han tenido magnitudes elevadas indicándose así en la propia carta, (el signo convencional indica el movimiento más importante originado en cada región epicentral normal). Además se indica si el foco es de profundidad normal o mayor de 60 km.

La mayor concentración de epicentros en la carta se observa en la región limítrofe con Guatemala y frente a las costas del Pacífico en El Soconusco; pero en las otras zonas de Chiapas, aunque el número de epicentros sea menor, los movimientos han sido importantes como lo muestran los Apéndices A y B de la ref 11.

Los sismos más importante registrados hasta la fecha en el área de Peñitas han tenido intensidades del orden de IV a VI en la escala de Mercalli Modificada; estos sismos han sido de 5 a 7° de Magnitud, con profundidades focales de 60 km aproximadamente.

2c. Materiales disponibles

Con base en las condiciones geológicas y topográficas del sitio se optó por diseñar una presa de tierra y enrocamientos con núcleo central impermeable, respaldado con filtros, transiciones y enrocamientos compactados (fig 2.1b).

Dadas las formaciones geológicas que afloran en Peñitas, (lutitas y areniscas del terciario, depósitos de aluvión y suelos residuales del cuaternario), se cuenta con todos los

materiales necesarios para satisfacer en mayor o menor calidad, la demanda de materiales de construcción de la cortina.

En lo que sigue se mencionan algunos aspectos de la explotación de los bancos de materiales utilizados en esta obra:

2c.1 Bancos de material para el núcleo impermeable (1,1ch)

Para la construcción de la ataguía se hicieron exploraciones y muestreos con pala de postear en 13 bancos (1^a época). Parte de este material se utilizó en la plataforma para llevar a cabo la construcción de la pantalla impermeable y protegerla lateralmente cuando se terminara de colar los paneles. En la tabla 1 se presenta las propiedades de los materiales de los bancos explotados.

Para la construcción del núcleo impermeable de la cortina (2^a época) se llevaron a cabo exploraciones en bancos de material de mayor volumen y de alta plasticidad, sobre una cuadrícula cuando la superficie era más plana, en poligonal abierta cuando eran alargadas, o siguiendo curvas de nivel en el caso de colinas.

Los sondeos se practicaron con una perforadora Minute-Man, con barrenos helicoidales de 2" de diámetro. Por conveniencia de distancia y menos accidentes topográficos se explotaron los bancos La Fé, El Castaño y El Cacao, para obtención de la arcilla clasificada como CH y el banco MI-AR para la arcilla clasificada como MH. Todos estos bancos se encuentran ubicados hacia aguas arriba, margen izquierda del sitio de la

boquilla. Para utilizar estos materiales, se formaron bancos de almacenamiento. También en la tabla 1 se presentan los valores promedio de las propiedades de los materiales de los bancos utilizados.

2c.2 Filtros (2)

Todo el material para filtro fue extraído con draga del lecho del río, acarreado y almacenado para su posterior colocación; los bancos fueron denominados Ledezma y Portillo y los almacenes Morelos I y II. En la parte superior de la cortina se colocó arena excedente de cribado para concreto, ya que resultó insuficiente el volumen de material en greña.

2c.3 Transición (3)

También del lecho del río se extrajo grava-arena; las determinaciones granulométricas se efectuaron conforme se requiriera para la selección y almacenaje o destinarla para filtros. Se vigiló que el porcentaje de finos fuera menor al 5%. En ocasiones se colocó directamente.

2c.4 Enrocamientos (4,5 y 6)

Parte del producto de las voladuras de arenisca del canal de llamada de obra de toma y de vertedores, se destinó como material para los enrocamientos. Se realizaba una cuidadosa exploración visual antes de llevar a cabo las voladuras y al momento de la carga debido a que en dichas zonas la arenisca estaba intercalada con estratos de lutita que producen finos plásticos.

3. DISEÑO

Para el estudio del material de aluvión se efectuaron sondeos de penetración estándar y pruebas Lefranc. En la fig 3.1 (sondeo SPE-2) se presenta un perfil estratigráfico derivado de estos sondeos, en el cual se incluye los resultados de pruebas de absorción de agua hechas en los barrenos. El aluvión está constituido por arena media a fina, con bajo contenido de limo y lentes de grava con boleos hasta de 30 cm de diámetro. En la fig 2.3 se muestra un corte longitudinal a lo largo del eje de la cortina, el perfil de la roca es más o menos regular y el aluvión alcanza una profundidad máxima de 55 m; cerca del contacto aluvión-roca se encontró un depósito de grandes bloques volcánicos, algunos de 1 m de diámetro, como se muestra en la misma figura.

3a. Cimentación

En virtud de la alta sismicidad de la zona de Peñitas y de la baja compacidad de los estratos arenosos superficiales de aluvión (15 m, fig 3.1), se decidió densificar el depósito aluvial mediante compactación dinámica, especificando que la

influencia del tratamiento debía llegar a 15 m de profundidad (mediante la expresión empírica $D = \sqrt{Wh} / 2$ siendo D espesor que se desea mejorar, W peso de la masa utilizada y h altura de caída de la masa). Además, para evitar la erosión interna de los depósitos aluviales, se decidió contruir una pantalla de concreto que penetrara en la roca.

Para comprobar los efectos de la compactación dinámica se hicieron pruebas con el presiómetro Ménard, el penetrómetro Sermes y un cono dinámico fabricado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En las figs 3.2 y 3.3 se presentan algunos resultados comparativos de mediciones hechas antes y después de la primera etapa de la compactación dinámica en los estratos en que se encontraba el material más suelto hasta una profundidad mínima de 12 m.

La compactación dinámica se efectuó en dos etapas, y cada etapa en dos fases (fig 3.4), primero se compactó la zona de la isla y el ramal izquierdo, construyendose después la primera etapa de la pantalla plástica, mientras el río circulaba por el ramal derecho; la segunda etapa se realizó después de desviar el río por un canal en la margen derecha.

Durante la compactación dinámica se llevó un registro estadístico de los volúmenes de los cráteres dejados por los impactos de la masa; en la fig 3.5 se presentan los histogramas de las mediciones efectuadas en la segunda etapa, donde se nota la gran diferencia entre los volúmenes de los cráteres producidos por la compactación inicial y los volúmenes medidos en la segunda fase. En la fig 3.6 se muestra una información semejante, en la que se relaciona el asentamiento al centro del cráter contra el número de golpes en cada fase, mostrando que en la segunda fase la curva se

vuelve asintótica a 1 m de asentamiento. La generación de presión de poro causada por la secuencia de impactos en un punto, se muestra en la fig 3.7; el pozo de observación del nivel freático se encontraba a 25 m del punto de aplicación de los impactos. El nivel del agua no varió más de 10 cm con cada impacto y su estabilización fue inmediata, mostrando así la naturaleza típica de un depósito de aluvión permeable.

3b. Pantalla impermeable

Se contruyó una pantalla impermeable en la cimentación para evitar filtraciones y la erosión interna de los depósitos aluviales. Se eligió esta solución por razones de costo y por los problemas técnicos que representaban las alternativas de tablestacado o delantal (ref 14). Las propiedades de los materiales de la pantalla se seleccionaron de manera que su módulo de deformación fuera similar al del aluvión evitando así altas concentraciones de esfuerzos y riesgo de falla. Esto se hizo debido a resultados obtenidos de un análisis de esfuerzo-deformación realizado con el método de elementos finitos (M.E.F.), en el cual se estudiaron los casos de una pantalla rígida y otra plástica, presentando un mejor comportamiento ésta última, por lo que los materiales se eligieron en forma tal que tuvieran un comportamiento plástico en conjunto.

Se intentó construir la pantalla en dos etapas utilizando mortero plástico; se presentaron deficiencias constructivas en la primera etapa, y dudándose de la calidad del diafragma, se realizaron sondeos tomándose algunas muestras con tubo Shelby y barril Denison, encontrándose que la pantalla tenía bolsas de arena. De pruebas de absorción de agua en los barrenos se observaron altas permeabilidades, por lo que se decidió reconstruir toda la pantalla en una sola etapa

utilizando concreto plástico; en la fig 3.8 se muestra un croquis de la pantalla defectuosa y la pantalla definitiva.

3c. Cortina

El diseño original de la cortina, así como algunas especificaciones de colocación y compactación de los materiales, fueron modificadas durante la construcción de la misma. Las modificaciones que se hicieron al diseño original son:

a) El proyecto contemplaba una pantalla impermeable rígida de concreto con una zona consolidada de inyecciones bajo el corazón impermeable y a los lados de la pantalla (fig 3.9). Por tratarse de una zona sísmica y con la experiencia adquirida en la presa La Villita estos elementos fueron suprimidos a causa del riesgo de fracturamiento en la pantalla, por efecto de concentraciones de esfuerzos (ref 5). Se reemplazó por una pantalla impermeable de material plástico utilizando además, como conexión un material arcilloso plástico para absorber mayores deformaciones; además y con la finalidad de aumentar la longitud de la línea de flujo que sigue al perímetro de la pantalla, y por lo tanto disminuir el gradiente hidráulico, se optó por llevar la pantalla al interior del corazón y profundizar el corazón dos metros más de lo proyectado (fig 3.10).

b) Se hizo la separación de la ataguía de aguas arriba del cuerpo de la cortina y se construyó la ataguía de aguas abajo únicamente con areniscas a volteo. Al separar la ataguía se buscó evitar en lo posible los asentamientos diferenciales en la estructura (figs 3.10).

c). Los materiales de los respaldos se redistribuyeron atendiendo a sus características mecánicas e hidráulicas y a

la disponibilidad real de los mismos (fig 3.11). A raíz de los resultados obtenidos de pruebas de campo y laboratorio se determinó que el material de los enrocamientos, al compactarse producía muchos finos, reduciendo así la permeabilidad de los mismos; esto ocasionaría, por encontrarse el proyecto en una región sísmica, que en el paramento de aguas arriba se generaran presiones de poro durante algún evento sísmico poniendo en peligro la estabilidad de la obra. El material del enrocamiento de aguas arriba se sustituyó por otro con características de un material de transición y se adicionó un dren de material de filtro. Lo mismo se hizo para el de aguas abajo pero con un dren de material de transición.

d) En la zona de contacto del corazón con la pantalla y en el contacto del corazón con las laderas se colocaron capas y franjas de material plástico (material 1ch) a fin de contar en tales zonas con un material deformable y poco erosionable. También se estimó conveniente colocarlo en la parte superior del corazón para aminorar el posible agrietamiento en la corona después de un evento sísmico o por asentamientos diferenciales en la cimentación.

Otra modificación al diseño fueron las plataformas a ambos lados de la cortina que se colocaron debido al exceso de material de arenisca (fig 3.10). Su colocación ocasionó, además, un aumento del factor de seguridad en la estabilidad de la cortina.

Las figs 3.15 y 3.16 presentan la sección definitiva de la cortina.

Debido a la baja permeabilidad presentada por los materiales de los enrocamientos (materiales 4s y 4'), entre

las elevaciones 55 y 59 aproximadamente, y en el contacto con las laderas aguas abajo, se colocaron dos drenes formados por boleas de 3 a 6" de diámetro, excedentes del cribado de grava-arena para concreto. Estos drenes tienen un ancho de 6 m y espesor de 4 m (fig 3.17).

Como una segunda línea de defensa contra la erosión interna de la arenisca, en caso de flaqueo de agua por las laderas, se colocó un filtro de material 2 en dos bandas de 5 m de ancho de 1.5 a 2 m de espesor desde la elev 55, entre los materiales del respaldo de aguas abajo y las laderas (fig 3.18).

4. CONSTRUCCION

4a. Historia de la construcción

El proyecto se empezó a construir en noviembre de 1979. La construcción de la cortina se realizó en el periodo comprendido entre mayo de 1984 y septiembre de 1986. Actualmente se encuentra en operación comercial, 1989.

En las figs 4.1 a 4.2 se presentan, en corte transversal y longitudinal, el avance de la construcción de la cortina, y en la fig 4.3 una gráfica del avance del terraplén contra tiempo.

El inicio del llenado del embalse comenzó el 22 de julio de 1986, estando el terraplén a la elev 94 (corona, elev 98), alcanzando el NAMINO⁽¹⁾ (elev 85) el 10 de agosto. El nivel del NAMO⁽²⁾ (elev 87.4) fue superado el 20 de octubre de ese

¹ NAMINO Nivel de aguas mínimo de operación

² NAMO Nivel de aguas máximo de operación

4b. Especificaciones de colocación de materiales

En la tabla 2 se presentan las especificaciones originales de construcción de la cortina, y a continuación se hace un recuento de las modificaciones que sufrieron:

-Material núcleo impermeable

Debido a la escasez de arcilla plástica (arcilla café, material 1ch) proveniente de los bancos y a que en la región se encuentra una arcilla limosa residual de color rojo (material 1) que presenta buenas características para ser utilizada en el núcleo impermeable, se decidió colocar esta última de la elev 58 hacia arriba.

Por lo que se comentó en la sección 3c.a de este trabajo, después de haber construido la pantalla plástica impermeable, cuyo cabezal quedó en la elev 59.5, se decidió colocar una capa de material 1ch con espesor de 5 m por encima de la pantalla, debido a que este material presenta una relativa alta deformabilidad y alta resistencia a la erosión interna. A final de cuentas se llevó hasta la elev 69, por existir material en exceso en el almacén.

Como la zona donde se ubica el P.H. Peñitas, Chis., es una de las más lluviosas del país, resultaba imposible lograr que el material 1ch se colocará con el 1% de contenido de agua en exceso al óptimo de la prueba Proctor CFE ($w_t = w_{opt} + 1\%$), como se tenía especificado al principio. Más adelante se cambió esta instrucción y se aceptó colocarlo con contenido de agua hasta un 5% superior al óptimo.

Por lo que respecta al material 1, el contenido de agua especificado para su compactación en terraplén era bajo comparado contra el contenido de agua en el banco, bajo esta circunstancia había que tenderlo y dejarlo secar para posteriormente compactarlo; se realizaron pruebas de compactación Proctor con el material pero con diferentes contenidos de agua inicial (w_1), determinandose que el contenido óptimo variaba dependiendo del contenido de agua inicial antes de la prueba. El resultado de estos ensayos permitió la colocación del material 1 practicamente con su contenido de agua natural (ver fig 4.4). Este fenómeno ocurre en suelos residuales.

-Material 2. Filtro

Durante la colocación de este material se modificaron las especificaciones de compactación recomendándose que el rodillo operara con la frecuencia mínima y se aceptó incluir partículas de hasta 3" de diámetro nominal, en vista de que el material en greña incluía gravas de este tamaño.

-Material 3. Transición

Esta grava-arena se colocó tal y como se especificó desde el inició; en ocasiones el material estuvo contaminado de finos, permitiendose un máximo del 5%. En otras ocasiones la contaminación se debió a ramas y piedras mayores de 4" de diámetro, que se retiraban manualmente durante la colocación del material en cortina.

-Material 4s. Enrocamiento compactado

El material colocado en estas zonas, producto de las excavaciones de los canales de llamada y de descarga de la casa de máquinas y de vertedores, al explotarse, cargarse y tenderse, se molía provocando el cierre de su estructura y baja permeabilidad, como se anota en el inciso 3c de este trabajo. El principal problema durante la colocación fue la segregación que se producía al tirar capas de 80 cm de espesor, ya habiéndose modificado antes la especificación de tender capas de 50 cm para evitar el rompimiento excesivo de partículas, por lo que se cambio nuevamente la especificación para colocar el material en capas de 40 cm compactando a cada 80 cm.

-Material 4'. Respaldos adicionales (en plataforma a la elev 65)

Se autorizó su colocación en capas de 1m de espesor, limitando el tamaño máximo a 24" y compactando cada capa con dos pasadas de rodillo Ingersol-Rand o Sakay.

-Material 5. Enrocamiento a volteo

En ambos taludes se autorizó la colocación de arenisca sana de las excavaciones de la obra de toma y/o vertedores.

-Material 6. Enrocamiento de protección

Al igual que para el enrocamiento a volteo y por cuestiones económicas se decidió colocar arenisca sana en lugar del conglomerado del banco Amacohite.

4c. Control de los materiales

El control de los materiales comenzó con el estudio para la explotación de los posibles bancos de material, como ya se mencionó en el subcapítulo 2c. Se realizaron sondeos de exploración de los bancos de material para el corazón impermeable e inspecciones visuales en las etapas de voladura y selección de materiales para los enrocamientos.

En la fig 4.5 y 4.6 presentan los límites de consistencia de la arcilla plástica café y de la arcilla roja respectivamente. Las curvas granulométricas del filtro, transición, enrocamiento compactado y filtros invertidos F1 y F2 obtenidas de calas efectuadas en el terraplén de la cortina (ref 6) se muestran en las figs 4.7 a 4.11.

En las tablas 3 y 4 se presentan las propiedades de los materiales obtenidas de las calas durante la construcción.

Respecto a los detalles constructivos en la colocación de materiales, como ya se mencionó en el subcapítulo anterior, la colocación del material 1 fue con el contenido de agua del almacén.

Respecto al material para filtros, este se colocó sin dificultad, teniendo en algunas ocasiones problemas de contaminación con finos no plásticos. Sin embargo, en todo momento el material cumplió con la especificación granulométrica.

La grava-arena en greña colocada como transición también en ocasiones estuvo contaminada con materiales finos, pero nunca se excedió el porcentaje permitido para esas zonas. En

algunas ocasiones la contaminación se debió a ramas y piedras mayores de 4" de diámetro, que se retiraban manualmente durante la colocación del material en cortina.

Para el material de los enrocamientos, producto de las excavación, al explotarse, cargarse y tenderse, se molía provocando el cierre de su estructura y baja permeabilidad que auspiciaron la colocación de drenes, como se anota en el inciso 3c.c de este trabajo. El principal problema de colocación fue la segregación que se producía al tirar capas de 80 cm de espesor, por lo que cambió esta especificación para colocarlo en capas de 40 cm compactando una de cada dos capas. Parte del material para el enrocamiento de protección se obtuvo apartando hacia los taludes los tamaños grandes del enrocamiento 4s. Pero también se colocó roca de banco en la zona 5 de la cortina, previa clasificación. Las rocas más grandes en banco se apartaron al tiempo de la carga para posteriormente enviarlas a la cortina y constituir el enrocamiento de protección contra el oleaje.

Se realizaron terraplenes de prueba con el material de arenisca para los enrocamientos para conocer su degradación ante el proceso de compactación, por lo que cabe revisar su erodibilidad, tomando las curvas granulométricas del material proveniente del banco y después de efectuada su compactación; en la fig 4.12 se presentan estas curvas granulométricas, la granulometría del material a volteo, curva 3, y la del material compactado, curva 4.

A continuación se presenta un análisis del potencial de erodibilidad de los enrocamientos:

La condición que debe cumplir el material para ser estable y no erosionarse cuando por él se establece un flujo, es que las partículas mayores sirvan como filtro para las menores.

Dividiendo el material en dos, es decir considerando un porcentaje x , correspondiente al material fino, y $100-x$ material grueso que funciona como filtro, determinaremos si se cumple la condición para que las partículas finas del filtro retienen a las partículas del suelo protegido

$$(D_{15})_g / (D_{85})_f \leq 5$$

siendo $(D_{15})_g$ diámetro tal que sólo el quince por ciento por peso de las partículas sean menores que él, en este caso del material grueso (o filtro).

$(D_{85})_f$ diámetro tal que sólo el ochenta y cinco por ciento por peso de las partículas sean menores que él, en este caso del material fino (o material a proteger).

Si $x=30\%$ de la curva 4 se tiene:

$$(D_{15})_g \Rightarrow 15\%(100-30)\% = 10\%, \quad (40\% \text{ en la gráfica}) \Rightarrow (D_{15})_g = 3\text{mm}$$

y

$$(D_{85})_f \Rightarrow 15\%(30\%) = 4.5\%, \quad (25.5\% \text{ en la gráfica}) \Rightarrow (D_{85})_f = 0.5\text{mm}$$

entonces

$$(D_{15})_g / (D_{85})_f = 6$$

Si $x=40\%$

$$(D_{15})_g = 10 \text{ mm}$$

$$(D_{85})_f = 1.5 \text{ mm}$$

$$(D_{15})_g / (D_{85})_f = 6$$

Si $x=20\%$

$$(D_{15})_g = 0.9 \text{ mm}$$

$$(D_{85})_f = 0.25 \text{ mm}$$

$$(D_{15})_g / (D_{85})_f = 3.6$$

Los valores determinados de la relación $(D_{15})_v / (D_{85})_f$ indican que el material está en el límite de autosuficiencia para retener sus propias partículas, pues dada la distribución granulométrica tan tendida era factible pensar en la migración de las partículas más finas arrastradas por algún flujo de agua, y como consecuencia la degradación rápida de cuerpo de la cortina.

5. INSTRUMENTACION

En la actualidad los métodos empíricos y analíticos siguen teniendo limitaciones para el diseño de presas, por lo cual la observación directa de las estructuras desde su construcción es una información valiosa para la generación de nuevos proyectos. El conocimiento de la evolución *in situ* de los esfuerzos y deformaciones actuantes en las diversas zonas de una cortina de enrocamientos, así como de su interacción, es de vital importancia para el proyecto adecuado de la estructura.

5a. Instrumentación en el cuerpo de la cortina

En seguida se describen algunos de los aparatos utilizados en la instrumentación de presas:

a) Extensómetros lineales. Se utilizan para conocer las deformaciones en el interior del cuerpo de la presa, midiendo los desplazamientos entre dos placas de referencia mediante una resistencia eléctrica variable conectada al exterior a través de un alambre trifilar impermeable,

protegido a su vez con tubería telescópica de fierro galvanizado. La precisión del aparato es de $\pm 0.01\%$ de la distancia entre placas (2.5 a 10m) y se considera que el medidor utilizado es económico, confiable y durable. En la fig 5.1 se muestran los diferentes modelos de extensómetros que se han instalado, y, el modelo utilizado en la presa Peñitas se presenta en la misma figura (5.1c).

b) Niveles hidráulicos. El uso de niveles hidráulicos para medir asentamientos en puntos internos de una presa, a lo largo de un alineamiento, se basa en el principio de vasos comunicantes. El diseño del aparato es simple y permite realizar mediciones con muy buena aproximación (± 1 mm). Sin embargo, para lograr mediciones confiables es indispensable que el conjunto de mangueras y válvulas estén libres de aire, además de utilizar agua desaireada. En la fig 5.2 se presentan detalles de este instrumento.

c) Celdas de presión. Se utilizan celdas de presión para conocer esfuerzos totales en el interior del cuerpo de la presa. La presión se mide utilizando un transductor neumático, el cual se opera desde el exterior de la presa a través de mangueras conectadas a un sistema de aire comprimido equipado con manómetros y válvulas de alivio (fig 5.3). El diseño consiste esencialmente en una cámara formada por dos láminas de acero inoxidable de calibre 16 y de sección circular, con una relación espesor/diámetro igual a 0.035 y con un anillo metálico de rigidez alrededor de la celda. El objeto de la relación mencionada y del anillo es disminuir los errores en la medición debidos a factores geométricos y al efecto de borde en la distribución de presiones en la celda.

d) Piezómetros. La medición de los niveles de agua y de la presión de poro es básica para analizar el desarrollo del proceso de consolidación y calcular esfuerzos efectivos a partir de las mediciones con celdas de presión total, así como para estimar filtraciones y la efectividad de pantallas impermeables y de sistemas de drenaje. Los instrumentos utilizados son de dos tipos: piezómetros abiertos tipo Casagrande y piezómetros neumáticos. El dispositivo de medición del piezómetro neumático es muy similar al transductor utilizado en las celdas de presión.

e) Inclinómetros. La medición de los asentamientos y desplazamientos horizontales en dos direcciones perpendiculares se realiza mediante una sonda introducida en ademes telescopiados acanalados de aluminio. Los inclinómetros utilizados son del tipo Slope Indicator (ref 17).

Las observaciones realizadas con este instrumento durante la construcción y primer llenado de las presas muestran resultados consistentes y confiables, aunque existen pequeñas diferencias con los resultados de las mediciones topográficas de precisión de la boca de los ademes referidos a bancos fijos en las laderas.

La revisión detallada de los registros de campo y de las gráficas de análisis, ha permitido concluir que el error que se comete en una medición puede dividirse en tres componentes: 1) aleatoria, 2) de calibración y 3) sistemática (ref 1). La repetición de una misma lectura con este aparato no lleva a resultados rigurosamente idénticos, aún en ausencia de movimientos de la tubería de ademe, debido al efecto conjunto de las imprecisiones de todas las partes.

de la sonda, a imperfecciones de las acanaladuras del ademe y a pequeñas variaciones en las profundidades de la lectura.

La sonda utilizada consta básicamente de un péndulo que registra la desviación angular respecto a la vertical mediante una resistencia variable; la lectura del valor de la resistencia se realiza desde el exterior utilizando un puente de Wheatstone.

Es claro que cuando el péndulo no se desplaza en su plano (por efecto de una inclinación de la tubería en el plano perpendicular al del péndulo), se generan fricciones en el rodamiento que soporta al eje de giro, tanto más importantes cuanto más inclinada esta la tubería. El resultado es una lectura poco confiable cuando existen inclinaciones mayores de siete grados, según el fabricante; sin embargo, las observaciones muestran que el efecto de la fricción del péndulo comienza a ser significativo a partir de tres grados.

f) Deformómetros. Se instalan para medir asentamientos, los aparatos utilizados son del tipo U.S. Bureau of Reclamation (ref 20), tanto en posición vertical (presa el Infiernillo) como inclinados (Chicoasen, El Caracol y Peñitas). Su operación es similar a la de los inclinómetros, y la diferencia radica en que la tubería esta formada por tramos que tienen brazos que quedan anclados al material.

5b. Localización de los instrumentos

El cuerpo de la cortina de Peñitas está instrumentada preferentemente en tres secciones, la secc A que se ubica en la parte media de la cortina (coord X=1000 "¹"), la secc C

¹El sistema de coordenadas (X,Y,Z) se muestra en la

ubicada hacia margen derecha (coord X=1100) y la secc D hacia margen izquierda (coord X=900); el eje de la cortina se denomina eje B. Nos referiremos a estas tres secciones durante la presentación de este trabajo.

En la fig 5.4 se presenta en planta y perfil la distribución de los instrumentos en el interior y superficie de la cortina. Cada sección cuenta en común con los siguientes instrumentos:

a) seis grupos de aparatos, distribuidos de la siguiente forma: los grupos 1, 2 y 5 se encuentran en el corazón arcilloso, el grupo 1 en la parte central sobre la pantalla impermeable, el grupo 2 cerca del filtro de aguas abajo a la misma elevación que el 1 y el grupo 5 en la zona central del corazón, a una elevación mayor que la de los grupos anteriores.

El grupo 3 se ubica en el filtro de aguas abajo, el grupo 4 en el material de enrocamiento y el grupo 6 en el material de transición, ambos aguas abajo. Cada grupo consta de seis celdas de presión total y seis extensómetros, además de dos piezómetros neumáticos. En la fig 5.5 se presenta la distribución tipo de los aparatos que conforman un grupo.

b) cuatro celdas de presión, para registrar presiones verticales totales, y asociados a ellas piezómetros neumáticos, ubicados a la elevación del cabezal de la pantalla impermeable dentro del corazón arcilloso, además de otros dos piezómetros neumáticos a ambos lados del grupo 1.

c) cuatro inclinómetros, anclados en la roca y distribuidos en la sección transversal de la cortina. El inclinómetro fig 3.4, las elevaciones están dadas por la coordenada Z.

sobre el eje B, atraviesa la pantalla plástica en las tres secciones.

d) doce niveles hidráulicos colocados en dos diferentes elevaciones: seis a la elev 62 y los otros seis a la elev 77; distribuidos regularmente desde la parte central del corazón hasta el paramento de aguas abajo.

e) ocho extensómetros en línea colocados en la dirección del río a la elev 98.

Además de lo anterior la secc A cuenta con seis deformómetros, colocados en forma simétrica, dos en el corazón, dos en filtros y los dos restantes en las transiciones; en la superficie de la cortina se colocaron cuatro líneas de mojoneras longitudinales y tres transversales (fig 5.4); también se instalaron veintiuna estaciones piezométricas en el material de aluvión, once aguas arriba y diez aguas abajo de la pantalla impermeable en forma simétrica, en cinco ejes perpendiculares al eje de la pantalla, como se muestra en la fig 5.6. Una red de piezómetros en las laderas. Por último se instaló un inclinómetro sobre el eje de la cortina, I-B1, cerca de la margen derecha. Se tiene proyectado instalar instrumentos para medir el comportamiento de la estructura ante sollicitaciones dinámicas, los cuales estarán integrados por: a) una red de cuatro sismógrafos distribuidos en torno al sitio de la presa y del embalse; b) un conjunto de tres a cinco acelerógrafos en el cuerpo de la presa y ambas margenes; c) medidores de presión instantánea; y d) dispositivos para realizar mediciones periódicas de velocidad de propagación de ondas a diversas profundidades en el cuerpo de la presa.

6. COMPORTAMIENTO

Los aspectos fundamentales que definen el buen comportamiento de la cortina de una presa, están referidos principalmente a la eficiencia hidráulica y bajo nivel de deformaciones desarrolladas durante su vida útil, por lo que el análisis está enfocado a determinar, en lo posible, el funcionamiento hidráulico y las causas de las deformaciones, a partir de los registros de la instrumentación para colaborar en el mejor conocimiento de cómo se comportan estas estructuras, para así llegar a diseños más racionales de las mismas.

En general el comportamiento de la cortina está referido a las tres secciones transversales instrumentadas. Para evaluar el comportamiento se revisan los asentamientos y desplazamientos horizontales, el nivel de esfuerzos y sus trayectorias, el funcionamiento hidráulico de la pantalla y la interacción que existe entre los materiales de la cortina. Las relaciones esfuerzo deformación son obtenidas de la información dada por los grupos de aparatos y posteriormente

son usadas para llevar a cabo un análisis del campo de esfuerzos y deformaciones utilizando el M.E.F.

Se analizará el problema de la interacción entre los materiales del corazón, de los filtros y de la pantalla, por ser este uno de los problemas que ha requerido un tratamiento especial debido a las consecuencias que puede generar en cuanto a la estabilidad de estas obras.

Con la finalidad de establecer si alguna zona de la cortina ha alcanzado la plastificación se consideraron los resultados de ensayos de laboratorio y se compararon con las trayectorias de esfuerzos registradas por los diferentes grupos de aparatos.

Por último se presenta la piezometría en el corazón comparada con la teórica, a fin de revisar los gradientes hidráulicos generados por el flujo a través del corazón

6a. Eficiencia de la pantalla

De acuerdo con la definición de Terzaghi y Peck (1968), se llama efectividad o eficiencia de una pantalla (E_h) a la relación entre la pérdida de carga ocasionada por ella (ΔH) y la carga hidráulica total en el embalse (H). Es factible utilizar esta definición para evaluar la eficiencia real de la pantalla puesto que se colocaron piezómetros a ambos lados de la pantalla. Existe otra definición para evaluar la efectividad basada en serie de hipótesis y correlaciones de resultados de otras estructuras de retención y se define como el valor que resulta de la ecuación $E_q = 1 - Q/Q_0$, propuesta por Kratochvíl y Halek (ref 13), en la que Q es el gasto de filtración a través de la pantalla, y Q_0 el caudal estimado

suponiendo que no existiera esa barrera. En seguida se revisa la eficiencia de la pantalla y se comparan ambos resultados:

1^o Criterio de Terzaghi y Peck. Como se mencionó anteriormente en el cap 5, el depósito de aluvión se instrumentó con 21 estaciones piezométricas para cuantificar la eficiencia de la pantalla. En la fig 6.1 se muestra la evolución piezométrica en función del avance de la construcción de la pantalla y en la fig 6.2 se muestra una gráfica similar con tres curvas: una indica la diferencia de niveles entre el embalse y el nivel del río aguas abajo (curva 2), mientras las otras dos muestran el promedio de las diferencias de niveles entre los piezómetros de aguas arriba y abajo de la pantalla (curvas 3 y 4). En general se observa una eficiencia alta, 95%, cuando el nivel de agua en el embalse alcanza el nivel de operación (posteriormente se perdieron algunos los piezómetros de aguas arriba).

2^o Criterio de Kratochvil y Halek. La cantidad de agua que fluye a través de la pantalla impermeable y por metro de longitud se calcula de acuerdo con Ambraseys (1963) de la siguiente forma:

$$\frac{Q_0}{k_0 H} = \frac{1}{0.88 + \left[\frac{B}{D} + \left(\frac{k_0}{k} + 1 \right) \frac{E}{D} \right]}$$

donde:

Q₀- gasto de filtración en m³/s y por metro de longitud de la pantalla.

B- ancho del núcleo en su parte inferior, en m

D- espesor del depósito permeable de la cimentación, en m

k₀- permeabilidad del terreno de cimentación, en m/s

k- permeabilidad de la pantalla, en m/s

E- espesor de la pantalla, en m
 H- carga de agua en el embalse, en m
 en este caso B=24 m, D=50 m, E=0.8 m, $k_0=2 \times 10^{-4}$ m/s (ref 2),
 $k=1 \times 10^{-8}$ m/s (ref 5) y tomando un valor promedio de 370 m de
 longitud de pantalla, tenemos que:

$$Q_0/k_0H = 0.03$$

si H=35m, el gasto total a través de la pantalla resulta de
 0.48 m³/min que es un gasto razonable. No debe olvidarse que
 este cálculo es válido solo si la pantalla no presenta ningún
 defecto o apertura y si es perfectamente continua hasta
 penetrar en la roca basal.

El gasto Q que pasa a través de la cimentación utilizando
 la red de flujo de la fig 6.3, donde el número de canales de
 flujo es 5 (n_f) y el de caídas de potencial 7 (n_c) es:

$$Q = kH \frac{n_f}{n_c} = 5 \text{ l/s/m}$$

entonces:

$$E_0 = 1 - \frac{Q_0}{Q} = 99\%$$

lo que representa una similitud muy aproximada entre la
 eficiencia real a la calculada con el criterio anterior.

Debe tenerse en cuenta que en los análisis anteriores se
 supuso, para simplificar el cálculo, al corazón de arcilla
 infinitamente impermeable, mientras que para el análisis
 piezométrico del corazón (secc.6f), por la misma razón, se
 supondrá a la pantalla infinitamente impermeable.

6b. Relaciones esfuerzo-deformación de los materiales *in situ*, pruebas de placa y análisis con el M.E.F.

El análisis de los estados de esfuerzos y deformaciones se hace con el fin de obtener 1) las relaciones esfuerzo-deformación de los materiales de la cortina durante la etapa de construcción 2) poder calibrar los criterios empleados en la selección y variación de las propiedades de los materiales en los análisis efectuados con el M.E.F., y 3) predecir a futuro el comportamiento *a priori* de las estructuras.

Para poder realizar el análisis del estado de esfuerzos y deformaciones es necesario que en el campo se instalen como mínimo seis celdas de presión y seis extensómetros en cada grupo de aparatos y en distintas direcciones, con la condición de que dos direcciones cualesquiera sean linealmente independientes. Se puede realizar el análisis en términos de esfuerzos efectivos si además se cuenta con piezómetros para la medición de presión de poro.

En cada dirección de medición i , definida por sus cosenos directores $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ respecto a un sistema general de ejes la deformación lineal e_i se expresa mediante la ecuación

$$e_i = e_1 \alpha_i^2 + e_2 \beta_i^2 + e_3 \gamma_i^2 + 2g_1 \beta_i \gamma_i + 2g_2 \alpha_i \gamma_i + 2g_3 \alpha_i \beta_i \quad (1)$$

siendo

$$D = \begin{bmatrix} e_1 & g_3 & g_2 \\ g_3 & e_2 & g_1 \\ g_2 & g_1 & e_3 \end{bmatrix}$$

el tensor deformación en el entorno del punto de medición.

El conocimiento de los seis valores de e_i en seis direcciones diferentes permite entonces establecer mediante la ec 1 un sistema de seis ecuaciones lineales. Su resolución proporciona los valores de las seis incognitas $e_1, e_2, e_3, g_1, g_2, g_3$, que definen el tensor deformación \bar{D} . El mismo razonamiento es válido para el caso del tensor de esfuerzos \bar{E} , con

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} n_1 & t_3 & t_2 \\ t_3 & n_2 & t_1 \\ t_2 & t_1 & n_3 \end{bmatrix}$$

El conocimiento de los tensores \bar{D} y \bar{E} referidos a un sistema general de ejes permite determinar la magnitud y dirección tanto de las deformaciones como de los esfuerzos principales ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

Determinado lo anterior se procede a trazar (para cada uno de los grupos donde es posible realizarlo), la trayectoria de esfuerzos en términos de la semisuma (p) y la semidiferencia (q) de los esfuerzos principales efectivos mayor $\bar{\sigma}_1$ y menor $\bar{\sigma}_3$.

En los grupos instalados en la cortina, la trayectoria de esfuerzos registrada por cada uno, es lineal o cercana a esta condición y se mantiene así casi todo el período de construcción, salvo en los casos donde esta trayectoria alcanza la envolvente de falla y continúa por ésta, o por que se llegó a la altura de terraplén correspondiente. Si la relación σ_1/σ_3 se mantiene constante, es posible reproducir en el laboratorio el proceso constructivo mediante un ensaye triaxial manteniendo dicho parámetro constante, a fin de obtener las propiedades mecánicas del material para realizar los análisis convenientes. En la fig 6.4 se presentan dichas

trayectorias, que se comentaran más adelante junto con los resultados de pruebas de laboratorio (inciso 6e).

Los esfuerzos y deformaciones octaédricas, se definen mediante las relaciones

$$\bar{\sigma}_{oct} = -\frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)$$

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{3}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$$

$$\tau_{oct} = -\frac{1}{3}[(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2]^{1/2}$$

$$\gamma_{oct} = -\frac{1}{3}[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2}$$

siendo $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, y $\bar{\sigma}_3$ los esfuerzos principales efectivos y ϵ_1 , ϵ_2 , y ϵ_3 las deformaciones principales.

Con estos valores puede graficarse la variación del ϵ_{oct} en función de $\bar{\sigma}_{oct}$ y el γ_{oct} en función de τ_{oct} que se presenta en la fig 6.5.

Se nota la tendencia a la linealidad en todas las curvas trazadas, durante la etapa de construcción, excepto la correspondiente a ϵ_{oct} - $\bar{\sigma}_{oct}$ del grupo 1C; en este caso el extensómetro EX (en dirección del río) sufrió fuertes extensiones por localizarse en parte dentro de la pantalla y en parte fuera de ella; por tanto esta medición esta alterada, por la penetración de la pantalla en el corazón.

Tomando en cuenta los resultados presentados en las figuras anteriores puede escribirse para cada material (o grupo, en este caso)

$$\bar{\sigma}_{oct} = K \epsilon_{oct}$$

$$\tau_{oct} = G \gamma_{oct}$$

designando por K el coeficiente de deformabilidad volumétrica y G el módulo de rigidez al cortante del material. Estas relaciones son formalmente idénticas a las de la teoría de la elasticidad con:

$$K = -\frac{E}{1-2\nu}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

siendo E el módulo de Young del material y ν su relación de Poisson. A partir de las curvas $\bar{\sigma}_{oct}-\epsilon_{oct}$ y $\tau_{oct}-\gamma_{oct}$ es posible encontrar los valores de E y ν correspondientes al material que rodea los diferentes grupos de aparatos. En la tabla 5 se presentan estos valores especificando el grupo y material donde fue colocado.

Es importante señalar que los resultados para el material del núcleo corresponden posiblemente al material 1, debido a que durante la construcción se colocó éste material envolviendo a los grupos 1 y 2 de las seccs A y C en un espesor de 4 m (fig 6.6), quedando únicamente los grupos 1 y 2 de la secc D envueltos por el material 1ch, grupos en que no fue posible llevar a cabo este análisis ya que algunas celdas dejaron de funcionar.

6b.2 Pruebas de placa confinada (ref 7) y de consolidación.

Las pruebas de placa se emplean para determinar las características de deformabilidad del material *in situ*. Los resultados que de ellas se obtienen son locales puesto que generalmente la prueba se realiza en la superficie y su zona de influencia se ve limitada por el bulbo de presiones desarrollado. En el caso de presas esta limitación no es tan seria ya que el proceso constructivo permite ir realizando ensayos en cada capa de material tendido.

Las pruebas de placa efectuadas en el P.H. Peñitas se realizaron empleando el mismo equipo desarrollado en el C.H. Chicoasén para esta finalidad (ref 16). Estas pruebas de placa difieren de las convencionales puesto que incluyen una placa anular mediante la cual se proporciona confinamiento al material ensayado, de ahí que se le denomine prueba de placa confinada.

El equipo utilizado en la realización de la prueba de placa confinada consiste básicamente de dos placas rígidas de acero, una central de 80 cm de diámetro y 2" de espesor y otra de 2.40 m de diámetro exterior y 80 cm de diámetro interior, compuesta de una placa de 3/4", rigidizada con viguetas; una plataforma metálica de 5.75 y 4.55 m en planta y 53.5 cm de altura; dos rampas metálicas de acceso a la plataforma; un camión cargado que sube a la plataforma y sirve para asegurar la reacción de los gatos hidráulicos contra las placas; y extensómetros de carátula (figs 6.7 y 6.8).

El procedimiento de la prueba consiste en dar a ambas placas una presión de 1 kg/cm^2 midiendo los asentamientos con

respecto a un sistema fijo de referencia y después aplicar incrementos de 1 kg/cm^2 a la placa central, dejando transcurrir un tiempo preestablecido entre cada incremento. La prueba continúa hasta alcanzar una presión de 4 kg/cm^2 en la placa central y después se descarga en decrementos de igual magnitud.

El valor de E se establece mediante la expresión dada por la Teoría de la Elasticidad para calcular el asentamiento de una placa rígida:

$$E = \frac{1-\nu^2}{2a} \frac{\Delta p}{\Delta \delta}$$

donde:

- a es el radio de la placa
- Δp incremento de la carga en la placa
- $\Delta \delta$ asentamiento de la placa

esta expresión permite conocer el módulo de deformación de un material elástico semi-infinito cargado en su superficie.

En la tabla 6 se presenta el valor promedio de las propiedades de los diferentes materiales de la cortina obtenidas a partir de las pruebas de placa (ref 7), y también las medidas a partir de la instrumentación (estas últimas utilizadas para el análisis de la cortina con el M.E.F.).

Es sorprendente la similitud de los resultados obtenidos por estos dos mecanismos para la determinación de las propiedades de los materiales, a excepción del módulo de deformabilidad para el filtro; sin embargo, nótese que el filtro se constituyó de dos materiales diferentes y que en donde se realizó la prueba, la granulometría del filtro era

más bien uniforme mientras que en donde se alojó el grupo de aparatos el filtro tiene granulometría bien graduada (figs 4.7 y 4.8).

No se cuenta con datos fidedignos de las características de deformabilidad del material 1ch, mediante pruebas de placa. Cabe señalar que para el material 1, las pruebas de consolidación de laboratorio proporcionaron valores de su deformabilidad ($1/mv$) similares a los arrojados por las pruebas de placa (tabla 6).

6b.3 Método del elemento finito.

El análisis de los campos de esfuerzos y deformaciones con el M.E.F., se realizó considerando un estado de deformación plana en la sección máxima de la cortina, utilizando para los distintos materiales de la cortina las propiedades obtenidas mediante las relaciones esfuerzo-deformación de los materiales *in situ* (obtenidas de los grupos de aparatos); en las figs 6.9 y 6.10 se presentan los resultados de dicho análisis, en cuanto a vectores de desplazamiento y la configuración de los esfuerzos verticales respectivamente. Nótese en la figura de desplazamientos la tendencia que sigue el material de la cortina a desplazarse hacia el interior de la misma, mientras que el material de la cimentación hacia el exterior; en la figura de la configuración de esfuerzos se aprecia la interacción entre los distintos materiales y sobre todo en el material del corazón que rodea la pantalla y en los filtros que es donde se observa una mayor concentración de esfuerzos. Una de las consideraciones fundamentales para el análisis con este método fue la constancia de los valores de E y ν para cada material durante todas las etapas de construcción simuladas, constancia que resulta de la linealidad antes comentada de las curvas $\epsilon_{oct} - \bar{\sigma}_{oct}$ y $\gamma_{oct} - \bar{\tau}_{oct}$.

6c Desplazamientos

6c. 1 Asentamientos

En las figs 6.11 a 6.13 se presentan los asentamientos ocurridos hasta el inicio del llenado en función de la elevación, registrados por los instrumentos que operan en cada una de las secciones. En las tres figuras se observa que la distribución de asentamientos dentro del corazón impermeable (inclinómetros I-AB, I-CB, I-DB y deformómetros D-3 y D-4), es cercana a una distribución parabólica, aunque deformada por la presencia de la pantalla y de la frontera entre los dos materiales arcillosos a lo largo del eje B.

El asentamiento máximo al término de la construcción en la secc A es de 52 cm a la elev 66, en la secc D es del mismo orden pero a la elev 68, mientras que para la secc C es de 40 cm a la elev 66. Si consideramos que el espesor de material de aluvión de la cimentación es del orden de la mitad en la secc C respecto a la A, podemos decir que esta es la razón de la diferencia de comportamiento. Lo que se comprueba al analizar la elev 50: mientras que para las seccs A y D el asentamiento es de 15 a 16 cm, en la secc C es de solo 6 cm. Los asentamientos después del llenado han sido mínimos, alcanzando un valor máximo de 8 cm en la secc A para la fecha del 21 de octubre de 1986.

Los asentamientos diferenciales entre el corazón y los filtros, se pueden apreciar perfectamente en la secc A donde se cuenta con deformómetros en el corazón cerca de los filtros (D-3 y D-4) y en los filtros (D-2 y D-5); se nota que cerca de la cimentación, el asentamiento en los filtros es mayor que en el corazón a partir de la elev 59 hacia abajo;

este aspecto se comentará en lo referente a interacción filtro-corazón. De los niveles hidráulicos (figs 6.14,15 y 16) se puede observar el asentamiento diferencial que existe entre los diferentes materiales de la cortina, los niveles V-9 y V-10, ubicados en filtros y transición de aguas abajo y a la elev 77, reflejan un mayor asentamiento diferencial que el registrado entre V-3, V-4 y V-5, ubicados en los mismos materiales pero a la elev 61. Para el caso de las seccs A y D el nivel hidráulico V-2, ubicado en el corazón cerca del filtro de aguas abajo, reporta un asentamiento mayor que el V-1, ubicado en la parte central del corazón, ambos a la elev 61 aproximadamente, mientras que en la secc C sucede lo contrario, esto podría relacionarse con la existencia de la doble pantalla en las seccs A y D mientras que en la secc C únicamente existe una.

En las mismas figuras se presentan los asentamientos en las tres secciones y a dos distintas elevaciones (la que corresponde al cabezal de la pantalla y a la elev 77), para dos fechas, 20 de febrero y 20 de julio de 1986, (la elev 77 no fue alcanzada en la primera fecha). Estas figuras muestran el asentamiento relativo entre materiales de la cortina y como se ve afectado dicho asentamiento por la presencia de la pantalla; nuevamente se aprecia que la magnitud de los asentamientos en la secc C es menor; además en todas ellas la distribución de los asentamientos es simétrica con respecto al eje de la pantalla.

Los asentamientos calculados y su comparación con los medidos, se presentan en la fig 6.17; en esta figura se han gráficoado los asentamientos ocurridos en la secc A y los asentamientos calculados por el análisis numérico; también se tienen gráficoados los asentamientos registrados por el

inclinómetro I-AB hasta la fecha de inicio del llenado y los valores de los asentamientos calculados en los diferentes nudos que se ubican en el eje B en esta sección. El error máximo a la elev 64.8 es aproximadamente de un 10% respecto al asentamiento medido. Este error puede estar asociado a la diferencia de módulos de deformabilidad que existe entre las arcillas que conforman el corazón, diferencia que no se consideró en el análisis numérico y además a que el módulo de deformabilidad del aluvión se tomó de pruebas de dinámicas (cross hole) y de experiencias con materiales similares, puesto que no se realizaron pruebas de placa para su determinación.

6c.2 Desplazamientos horizontales

La magnitud de los desplazamientos laterales obtenidos de los inclinómetros (figs. 6.18 a 6.21), caen dentro del error máximo que se puede tener en este tipo de mediciones, si se considera que el error máximo es de 1" por cada tramo de 10 m de inclinómetro. Para una longitud de 40 m de inclinómetro, que corresponde a la altura de la cortina, resulta que el error máximo que se puede tener es de 10 cm. En campo, el desplazamiento lateral máximo antes del llenado es aproximadamente igual a esa misma cantidad (inclinómetro I-AB); esto indica que los resultados no son claramente representativos del comportamiento de la cortina, pero sí indicativos en cuanto a su distribución y tendencia al desplazamiento.

Tomando en cuenta lo anterior y pasando a las figuras de desplazamiento horizontal en las secciones transversales (figs 6.18 a 6.20), se tiene que el comportamiento de dichos inclinómetros puede dividirse en dos: uno que corresponde a

los desplazamientos medidos en el material de cimentación y otro que corresponde propiamente a la cortina. En las seccs A y C los desplazamientos registrados en la cimentación concuerdan con el movimiento esperado, ya que los inclinómetros colocados aguas arriba y aguas abajo se desplazan respectivamente hacia aguas arriba y abajo. Dentro de la cortina todos los inclinómetros indican que los desplazamientos son en general hacia aguas arriba y el cambio de dirección del movimiento, es decir, el desplazamiento cero, coincide con la frontera del material Ich con el material 1 (elev 69). En el caso de la secc D se presenta un comportamiento similar excepto que en el inclinómetro I-D1 no se define una tendencia clara de desplazamiento y el inclinómetro I-DB, posiblemente por errores de medición, tiene desplazamientos hacia aguas abajo en toda su longitud.

Por lo que se refiere a los desplazamientos laterales según la sección longitudinal máxima de la cortina, existe una elevación donde los desplazamientos cambian de sentido, en los inclinómetros I-AB, I-CB y I-DB: el material de aluvión se desplaza hacia las laderas, mientras que el material de la cortina se desplaza hacia el interior del valle (fig 6.21); de hecho el material de cimentación sufre durante la construcción movimientos que corresponden a los de un medio semi-infinito cargado por el peso de la cortina, desplazandose hacia las fronteras rígidas y arqueandose sobre ellas.

El máximo desplazamiento horizontal calculado en la dirección transversal a la cortina fue de 4 cm aproximadamente, valor que esta dentro de los límites del error máximo que se puede tener en las lecturas de los inclinómetros, por lo que su valor no es significativo aún cuando da idea del comportamiento rígido de la cortina en cualquier dirección horizontal.

6d. Interacción corazón-pantalla y corazón-filtro

Para la discusión del fenómeno de interacción entre corazón-pantalla y corazón-filtros nos basaremos en la fig 6.22, donde se muestra de manera cualitativa la distribución de asentamientos y esfuerzos en un material blando rodeado por un material rígido (por ejemplo en el caso de los silos). El material blando al colgarse de las paredes del recipiente (por efectos de fricción o adherencia), ocasiona que los asentamientos sean mínimos en las orillas y máximos al centro, a su vez los esfuerzos verticales presentan una distribución simétrica a la de los asentamientos: esfuerzos verticales menores en las orillas y máximos al centro; este fenómeno se denomina arqueo. Cuando se incluye un material relativamente rígido dentro del recipiente, esto hace que tanto la distribución de asentamientos como de esfuerzos cambie. Sin embargo la integral con respecto al área de los esfuerzos verticales ha de permanecer constante, como se muestra cualitativamente en la misma figura.

Revisando las figuras correspondientes a los asentamientos (figs 6.14 a 6.16) y la fig 6.23 donde se muestran las distribuciones de esfuerzos verticales efectivos medidos en el corazón, durante el período de construcción y para una fecha posterior al inicio del llenado, resulta que las distribuciones de asentamientos y esfuerzos presentan la misma distribución descrita en el párrafo anterior (fig 6.22), y demuestra la existencia de la interacción de los tres elementos de distintas rigideces (filtro, corazón y pantalla).

En la fig 6.11 (asentamientos contra elevación en la secc A), se aprecia que los deformómetros instalados en el corazón (D-3 y D-4) registran mayores asentamientos que los colocados

en los filtros (D-2 y D-5) sucediendo esto hasta la elev 59 aproximadamente. Este asentamiento diferencial entre filtro y corazón ocasiona que el corazón (de mayor deformabilidad) cargue al material del filtro, como lo demuestran también los resultados del M.E.F.. Abajo de la elev 59, los filtros sobrecargados por efecto de la interacción con el núcleo en su parte superior, sufren asentamientos superiores a los del corazón, como se aprecia en las curvas 4, 5, 8, 9, 10 y 11 de la fig 6.11.

Cabe mencionar que los esfuerzos verticales efectivos en el corazón varían con el transcurso del tiempo (fig 6.23), aumentando paulatinamente la concentración de esfuerzos sobre la cabeza de la pantalla impermeable. En las seccs A y D la distribución de esfuerzos es simétrica respecto a la doble pantalla existente, mientras en la secc C, en la que existe una sola pantalla, la distribución de esfuerzos verticales es inicialmente asimétrica (aunque el funcionamiento de los piezómetros de esta sección es dudoso, como se anotará en el inciso 6.f).

La comparación entre los esfuerzos verticales efectivos medidos y calculados se presenta en la fig 6.24, donde se ha dibujado, la magnitud de los esfuerzos registrados por las celdas verticales de la secc A el 20 de julio 1986. Las diferencias son mínimas, aún cuando aumentan en la cercanía de la frontera corazón-filtro.

6e. Zonas de plastificación

Para el material del corazón resulta difícil por dos razones comparar directamente las envolventes de falla de laboratorio con las trayectorias de esfuerzos registradas por la

instrumentación: 1) la diversidad de los bancos de préstamo y 2) el comportamiento registrado por los grupos de aparatos 1 y 2 de las seccs A y C que no pueden asociarse claramente con el de un solo material, pues estos grupos quedaron envueltos por una banda de 4 m de espesor del material 1 en medio del material 1ch. A pesar de lo anterior se han trazado las envolventes de los ensayos triaxiales de laboratorio, (CU), en términos de p y q (en esfuerzos totales) para muestras obtenidas del terraplén y de igual manera las trayectorias de esfuerzos registradas por los grupos de aparatos instalados en el corazón. En la fig 6.25, se muestra que los grupos 2D y 5A instalados en el material 1ch y 1 respectivamente alcanzan las envolventes de falla obtenidas de las pruebas triaxiales; el grupo 1D no se graficó porque fallaron algunas de sus celdas. Esto parece indicar que el material que envuelve a los dos grupos está plastificado (fig 6.26 doblemente sombreada). Los grupos 1 y 2 de las seccs A y C y 5 de las seccs C y D no registran éste comportamiento pero las envolventes de falla de la arcilla rojiza mostrada en la fig 6.25 corresponden a contenidos de agua de 29.6 a 32.1%. Y la estadística efectuada con muestras de este material obtenido de calas del terraplén (tabla 3) muestra que el valor promedio de su contenido de agua de compactación es de 33.1% y su desviación estandar 4.5%. Es de esperar por lo tanto que la envolvente de falla correspondiente a este contenido de agua se acerque a la trayectoria de esfuerzos medida en campo, para los grupos 1 y 2 de las seccs A y C y 5 de C y D, y esto significaría que la arcilla roja colocada en la franja de 4 m también esta plastificada.

De los ensayos triaxiales realizados en el material de enrocamiento, se obtuvo un valor para el ángulo de fricción interna de 33° , en términos de esfuerzos efectivos (ensaye

triaxial consolidado no drenado CU), y de 48° en un ensaye triaxial con material seco (ref 4), mientras que los valores de este ángulo alcanzados en las trayectorias de esfuerzos registradas por el grupo 4 en cada sección fueron 58° (?), 42° y 36° en las seccs A, C y D respectivamente; lo anterior indica que en las seccs A y C el material que rodea a estos grupos se encuentra sobre la envolvente de falla y en la secc D esta cerca de esta condición.

En la fig 6.26 se pretende mostrar la zona plastificada de la cortina como resultado de lo registrado por la instrumentación y pruebas de laboratorio para el caso del material arcilloso; y de la misma instrumentación, ensayos de laboratorio y análisis numérico para los materiales granulares. Cabe aclarar que las relaciones σ_1/σ_3 del M.E.F. reportaban valores muy elevados, por encima de la relación σ_1/σ_3 dada por los ensayos de laboratorio, pero se debe considerar que entre las limitaciones del análisis numérico se encuentra la de no reproducir los efectos que ocasiona el proceso de compactación en el terraplén, es decir, el M.E.F. no considera que existen esfuerzos residuales (o atrapados), provocados por el proceso de compactación (refs 9,12 y 18).

Considerando que la magnitud del esfuerzo residual sea igual a $k_p \gamma h$, donde k_p es el coeficiente de empuje pasivo y γh el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad de influencia máxima del equipo de compactación, es factible reducir la relación σ_1/σ_3 y obtener de una manera aproximada las zonas plastificadas de la estructura, salvando así la limitante del análisis numérico (fig 6.26).

Durante el llenado las mediciones indicaron la ocurrencia de una falla en el filtro de aguas arriba de la secc D que

confirma la plastificación de esta zona. El inclinómetro I-D1 colocado en el filtro de aguas arriba mostró un asentamiento brusco entre las elevs 60 y 62.3 provocando un asentamiento del material sobreyacente hasta la elev 77, es decir, muestra un asentamiento en todo el material del filtro por el que atraviesa este inclinómetro. Dicho asentamiento ocurrió en dos etapas la primera, entre el 1^o y el 15 de agosto y la segunda entre el 1^o y el 27 de octubre de 1986. En general todas las celdas y piezómetros neumáticos colocados en el corazón de arcilla y sobre todo los situados en la parte central, muestran un incremento en sus registros en las fechas 1^o de agosto y el 14 de octubre. En estas fechas se realizaba el llenado del embalse teniéndose que el 1^o de agosto la elevación del mismo alcanzaba la cota 72 y el 10 de agosto la cota 83. Respecto a la trayectoria de esfuerzos seguida por el grupo 3 (ubicado en el filtro de aguas abajo), tenemos que el ángulo de fricción interna alcanza un valor de 43° para estas fechas, siendo que para un material de esta naturaleza el valor del ángulo de fricción interna es de 42° (Chicoasén, en deformación plana); suponiendo que el estado de esfuerzos es simétrico debido al proceso constructivo y tratándose del mismo material, es de suponerse que el filtro de aguas arriba falló debido a que se encontraba cerca o sobre su envolvente de falla. Al irse llenando el embalse, se generó un desplazamiento hacia aguas abajo del corazón por el empuje hidrostático, ocasionando una reducción del esfuerzo horizontal sobre el filtro sobreviniendo el asentamiento; dicho asentamiento fue del orden de 2 cm en el inclinómetro I-D1; la condición anterior es similar en las otras dos secciones aunque no se muestra claramente hasta la fecha.

6.f Piezometría en el corazón

En la fig 6.27 se presenta la red de flujo trazada en el corazón, suponiendo al material homogéneo e isótropo y las lecturas piezométricas registradas el 5 de mayo de 1987, casi un año después del inicio del llenado; estos mismos valores se presentan en la tabla 7 , donde se comparan también con los valores teóricos dados por la red de flujo. Los once piezómetros que existen por sección, seis de ellos en la secc A, siete en la secc D y únicamente dos en la secc C, registran presiones muy similares a las teóricas, aunque esto no implica necesariamente que la red de flujo sea real. En la secc C, los piezómetros registran lecturas muy superiores a las de las otras secciones. En el caso de los piezómetros PN5 y 6, se verificó en campo, que su funcionamiento es deficiente. Los piezómetros 2PN1 y 2PN2 indican gradientes de 2.2 y 2.3 respectivamente, siendo el valor máximo aceptable de 5 para el caso de presas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La escasez de recursos exige promover diseños más racionales de las presas de tierra y enrocamientos, y con tal propósito este trabajo se enfoca en su parte de análisis a aportar algunas luces sobre el comportamiento de estas estructuras. Las conclusiones y recomendaciones resultantes se exponen a continuación:

1. A pesar de los problemas técnicos que se presentaron durante la construcción de la pantalla, se logró una eficiencia alta de la misma; la utilización de los distintos materiales para darle un comportamiento plástico redujo las concentraciones de esfuerzos en su cabeza y en el material que queda por arriba de ella.

2. La interacción entre los elementos que conforman la cortina debido a la diferencia de rigideces, ocasiona que en los más rígidos se concentren los esfuerzos, tal es el caso de los filtros que soportan al corazón y a las transiciones; la pantalla genera concentraciones en el material adyacente del corazón y a su vez toma importantes esfuerzos transmitidos por la cimentación. Evitar al máximo estas diferencias en rigidez entre los materiales es fundamental, y

utilizando apropiadamente los materiales disponibles puede reducirse tal interacción.

3. Eran de esperarse grandes asentamientos en el paramento de aguas arriba durante el primer llenado debido a la escasa calidad del material de los enrocamientos, opuestamente a lo esperado, los asentamientos fueron mínimos debido a que durante el proceso de compactación el material se trituró, tornándose éste más denso y compacto.

4. La obtención de las características esfuerzo-deformación mediante la instrumentación ha mostrado que:

- a) Los materiales se comportan como elástico-lineales, para la trayectoria de esfuerzos seguida durante la construcción.
- b) Se simplifica por tanto el cálculo con M.E.F.
- c) Las pruebas de placa que imponen al material una trayectoria de esfuerzos σ_1/σ_3 aproximadamente constante, proporcionan módulos de E muy semejantes a los obtenidos mediante la instrumentación.

De acuerdo con estas conclusiones y los resultados obtenidos con M.E.F., se confirma que el cálculo *a priori*, de una estructura puede efectuarse si se determinan las relaciones esfuerzo-deformación de los materiales mediante pruebas de placa en terraplenes de prueba.

5. Con base en los resultados de pruebas de resistencia al corte de los materiales y en las trayectorias de esfuerzos que se obtienen de la medición *in situ* es posible definir el contorno de las zonas plastificadas en la cortina.

Para incluir en un análisis de esfuerzo-deformación (por ejemplo el M.E.F.), la determinación de zonas plastificadas, convendría estudiar más a fondo la magnitud de los esfuerzos residuales generados por procesos de compactación, incluso

se pueden efectuar en los mismos terraplenes de prueba, determinaciones de estos esfuerzos mediante una instrumentación adecuada.

7. REFERENCIAS

1. Auvinet, G. (1972), "ERRORES EN LAS MEDICIONES REALIZADAS CON INCLINOMETRO", en Evaluación y desarrollo de la instrumentación para la presa La Angostura, Informe del Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. a la Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
2. C.F.E. (1969), "EXPERIENCIA EN PROYECTOS HIDROELECTRICOS" VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Cimentaciones. México, D.F., agosto.
3. C.F.E. (1974), "INFORME DE LAS PRUEBAS DE PERMEABILIDAD EFECTUADAS EN LA BOQUILLA PEÑITAS, CHIAPAS", Estudios Geológicos. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
4. C.F.E. (1983), "PROPIEDADES MECANICAS DE LA ARENISCA PROVENIENTE DE LAS EXCAVACIONES PARA LA OBRA DE TOMA Y CASA DE MAQUINAS DE LA C.H. PENITAS, CHIS.", memorandum N^o S-11-83, abril 22.
5. C.F.E. (1985), "COMPORTAMIENTO DE PRESAS CONSTRUIDAS EN MEXICO (1974-1984)", México, D.F.
6. C.F.E. (1987), "INFORME GENERAL, LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS", Laboratorio de Mecánica de Suelos, C.H. Peñitas, Chis.
7. C.F.E. (1987), "PRUEBAS DE PLACA CONFINADA EN LA CORTINA, P.H. PENITAS CHIS", memorandum N^o 87-37-GR. México, D.F.
8. C.F.E. (1987), "INFORME GENERAL DE CONSTRUCCION DE LA CORTINA, P.H. PENITAS, CHIS", memorandum N^o 87-05-GR. México, D.F. enero.
9. D'Appolonia D.J., R.V. Whitman "SAND COMPACTION WITH VIBRATORY ROLLERS", ASCE. Specialty Conference on Placement and Improvement of Soil to Support Structures, 1968.
10. de la Lata, R., Gutiérrez R., Moreno, M., G. y Carfatan, J. Ch. (1979), "GEOLOGIA Y TECTONICA DEL SURESTE DE MEXICO, PRINCIPALMENTE DEL NORTE DE CHIAPAS (ZONA PENITAS-CHICOASEN-ITZANTUN)", Informe del Instituto de Geología, UNAM, (Oficina Regional del Sureste) a la Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
11. Figueroa, J. (1973), "SISMICIDAD EN CHIAPAS", Publicación N^o316 del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
12. Hendron, A.J., (1963). "THE BEHAVIOR OF SAND IN ONE-DIMENSIONAL COMPRESSION", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois.

13. Kratochvil y Halek, V. (1961) "EFFICACITE DES ELEMENTS D'ETANCHEITE DES BARRAGES EN TERRE REALISES SUR UN TERRAIN PERMEABLE", VII congreso Internacional de Grandes Presas, Roma.
14. Marsal, R.J., Reséndiz D. (1971), "EFFECTIVENESS OF CUTOFFS IN EARTH FOUNDATIONS AND ABUTMENTS OF DAMS", Procs., IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, San Juan, Puerto Rico, Informe N^oE4, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
15. Marsal, R.J., Reséndiz D (1975), "PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTOS", Editorial Limusa. México.
16. Montañez, L., Ibarra, V., y Alberro, J., (1979), "PRUEBAS DE PLACA CONFINADA EN LA PRESA CHICOASEN, MEXICO", Memorias de VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Lima Perú, Vol II, p.p.449-457.
17. SINCO (1964) "SLOPE INDICATOR INSTRUCTION MANUAL", Seattle, Washington, USA.
18. Sowers, G.F., Robb, A.D., Mullis, C.H., y Glenn A.J. "THE RESIDUAL LATERAL PRESSURES PRODUCED BY COMPACTING SOILS", Memorias del IV Congreso Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Vol. II. Londres, 1957.
19. SRH-CFE-UNAM (1976), " COMPORTAMIENTO DE PRESAS CONSTRUIDAS EN MEXICO" (Behavior of dams built in México), Vol I, Contribución de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, al XII Congreso Internacional de Grandes Presas (México), Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, D.F.
- 20 U.S. Army Corps of Engineers (1971), "INSTRUMENTATION OF EARTH AND ROCKFILL DAMS", Engineering Manual EM1110-2-1908, Washington, D.C., USA.

TABLA 1. PROPIEDADES MEDIAS DE LOS BANCOS EXPLOTADOS (Ref. 6)

BANCO DE MATERIALES	γ_0	W_0	W_1	LL	LP	IP	S_*	G	S	F
1a. EPOCA										
GABRIEL LEDESMA	1786	17.1	25.1	40.1	24.0	16.1	----	4.7	52.8	42.5
FELIX PORTILLO	1690	20.4	25.1	48.5	25.6	22.9	----	0.6	34.4	65.0
ESTEBAN ESCOBEDO	1709	19.1	30.3	46.3	29.3	17.0	----	---	44.0	56.0
OCTAVIANO CRUZ	1677	22.9	27.1	47.2	27.0	20.2	----	1.3	37.9	60.8
BANCO 2 M.D.	1404	30.4	----	89.1	40.9	48.2	2.646	---	27.6	72.4
FERNANDO HERRERA 1	1819	16.0	18.6	39.8	25.0	14.8	----	5.7	46.2	48.1
FERNANDO HERRERA 2	1780	16.4	22.0	43.1	27.2	15.9	----	4.1	50.4	45.5
ZONA "A"	1421	30.4	39.4	62.3	36.6	25.7	----	3.0	40.7	56.3
ZONA "C"	1481	26.4	40.3	56.7	29.2	27.5	2.675	0.1	38.5	61.4
SUBESTACION 1	1431	30.6	38.4	70.3	38.2	32.1	----	---	32.3	67.7
SUBESTACION 2	1420	31.0	41.0	81.7	45.4	36.3	2.712	0.1	26.1	73.8
2a. EPOCA										
IMPESA AMPLIACION	1349	34.3	51.6	82.1	40.8	41.3	2.680	---	18.7	81.3
EL GAVILAN	1517	26.2	34.6	67.2	29.2	38.0	2.649	0.1	37.4	62.5
GUADALUPE HERNANDEZ	1462	27.6	33.5	77.7	34.4	43.3	2.693	0.7	28.3	71.0
LA ESPERANZA	1547	25.4	34.6	59.3	32.6	26.7	2.595	---	44.7	55.3
LA FE	1623	22.5	30.0	48.8	24.6	24.2	----	---	30.7	69.3
EL CACAO	1590	23.4	27.4	60.8	27.6	33.2	2.606	---	12.3	87.7

TABLA 1. Continuación

EL M.I.A.R.1711	19.0	28.1	50.2	28.5	21.7	2.619	0.3	55.5	44.2
BCC.DE	1666	20.9	27.3	55.3	26.9	2.618	---	18.0	82.0
ALMTO.CORTINA A.B.									

- γ_0 PESO VOLUMETRICO OPTIMO Kg/m³
- w_0 CONTENIDO DE AGUA OPTIMO %
- w_1 CONTENIDO DE AGUA INICIAL %
- LL LIMITE LIQUIDO %
- LP LIMITE PLASTICO %
- IP INDICE PLASTICO %
- S_m DENSIDAD DE SOLIDOS
- G GRAVAS %
- S ARENAS %
- F FINOS %
- PRUEBA PROCTOR CFE E-7 Kg-cm/cm³

TABLA 2. ESPECIFICACIONES ORIGINALES DE CONSTRUCCION

ZONA	MATERIAL	ESPECIFICACION DE CONSTRUCCION
1 Núcleo impermeable	Material arcilloso del banco "La Fe"	Colocado en capas de 20 cm de espesor en estado suelto, con el contenido de agua óptimo más 1% ($w_0 + 1\%$), compactado con 4 a 6 pasadas con rodillo pata de cabra o de almohadillas con peso estático mínimo de 10 ton*
2 Filtro	Grava-arena bien graduada cuya granulometría debe quedar entre los límites que se muestran en la fig 4.7; la curva granulométrica no debe tener cambios bruscos de pendiente ni discontinuidades. El tamaño máximo de partículas quedará limitado a 1.5" (4cm) y el porcentaje de finos (mat<mallá 200) será menor de 5%	Colocar en capas de 30 cm de espesor en estado suelto, utilizando camiones con descarga que impida la segregación del material, o bien, utilizar volteos convencionales y remezclar con motoconformadora. Compactar con un mínimo de dos pasadas de rodillo liso vibratorio autopropulsado, de peso estático mínimo de 10 ton**
3 Transición	Grava-arena bien graduada, cuya granulometría debe quedar comprendida entre los límites que se muestra en la fig 4.9; la curva granulométrica no debe tener cambios bruscos de pendiente ni discontinuidades. El tamaño máximo de partículas será de 4" (10cm) y no debe contener finos plásticos (mat<mallá 200)	Colocar en capas de 30cm de espesor en estado suelto, evitando la segregación del material, usando camiones con descarga especial o remezclando con motoconformadora. Compactar con un mínimo de 4 pasadas de rodillo liso autopropulsado, de peso estático mínimo de 10 ton**
4. Enrocamiento compactado	Producto de excavación de obra de toma y/o vertedor, seleccionando las partículas más sanas, limitando su granulometría como se muestra en la fig 4.10 El tamaño máximo de las partículas será de 12" (30cm) y no deberá contener finos plásticos	Colocado en capas de 50cm de espesor, tendido con tractor y compactado con 4 pasadas de rodillo liso vibratorio de 15 ton de peso estático máximo

TABLA 2. Continuación

ZONA	MATERIAL	ESPECIFICACION DE CONSTRUCCION
4p Enrocamiento compactado permeable	Grava-arena en greña, limitando su granulometría como se muestra en la fig 4.10. El tamaño máximo de las partículas será de 12"(30 cm) y no deberá contener finos plásticos	Colocado en capas de 50cm de espesor, tendido con tractor y compactado con 4 pasadas de rodillo liso vibratorio de 15 ton de peso estático máximo
4' Respaldos adicionales	Producto de la excavación no seleccionado de obra de toma y/o vertedor, limitando únicamente el tamaño máximo de partículas a 12" (30cm)	Colocado en capas de 50cm de espesor, con 2 pasadas de rodillo liso vibratorio de 15 ton de peso estático máximo
5*** Enrocamiento a volteo	Conglomerado del banco "Amacohite", tamaño máximo de partículas comprendido entre 30 y 80 cm de diámetro	Extendido con tractor
6 Enrocamiento de protección	Conglomerado del banco "Amacohite", granulometría uniforme; partículas mayores de 80cm de diámetro	Extendido con tractor

- Obtenido de la prueba₃ Proctor de laboratorio, con energía de compactación $E = 7 \text{ kg-cm/cm}^3$.
- ** El equipo más adecuado, así como el número de pasadas, deberá definirse mediante terraplenes de prueba.
- *** En el talud de aguas abajo se permite la sustitución de este material por la arenisca producto de las excavaciones del vertedor y/o obra de toma, seleccionando las partículas más sanas y posible siembra de pasto en la superficie del talud.

(Ref 4)

TABLA 3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DEL NUCLEO

	Arcilla plástica café			Arcilla limosa roja		
	N	\bar{X}	σ	N	\bar{X}	σ
γ_d	550	1522	51	725	1388	149
wt	550	27.1	2.7	725	33.1	4.5
γ_p	200	1554	187	547	1427	86
Wop	200	26.4	2.9	547	32.8	6.1
Ec	270	98.2	2.9	725	97.5	8.1
qu	221	1.88	0.46	686	2.74	0.88
Mi	221	33.7	29.1	686	129.1	103.2
LL	472	56.7	5.6	547	73.4	15.5
LP	472	27.4	2.1	547	34.7	4.2
Ss	481	2.66	0.23	553	2.67	0.24
e	481	0.75	0.08	725	0.93	0.13
GW	550	96.1	8.0	725	95.6	6.1
S	477	14.3	5.3	549	20.2	5.5
F	477	85.7	6.8	549	79.8	5.5

SIMBOLOGIA

γ_d	Peso volumétrico seco, en kg/m^3
wt	Contenido de agua en terraplén, en %
γ_p	Peso volumétrico seco máximo de laboratorio en prueba Proctor, en kg/m^3
Wop	Contenido de agua óptimo en laboratorio %
Ec	Eficiencia de compactación (γ_d/γ_p), en %
qu	Resistencia a la compresión simple, en kg/cm^2
Mi	Módulo de deformación tangente inicial en prueba qu, en kg/cm^2
LL	Límite líquido, en %
LP	Límite plástico, en %
Ss	Densidad de sólidos
e	Relación de vacíos
GW	Grado de saturación, en %
S	Contenido de arenas, en %
F	Contenido de finos, en %
N	Número de datos
\bar{X}	Promedio
σ	Desviación estándar

(Ref 8)

TABLA 4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES GRANULARES

	Filtro(2)		Transición(3)		Enrocamiento(4s)	
	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}
γ_d	161	1863	92	2009	41	1826
Wt	161	6.7	92	6.5	41	11.1
Ss	161	2.72	92	2.66	41	2.65
e	161	0.47	92	0.39	41	0.45
>3"	-	-	92	2.2	41	36.6
G	161	25.7	92	52.8	41	34.1
S	161	71.0	92	42.0	41	22.7
F	161	3.3	92	3.0	41	6.7

SIMBOLOGIA

- γ_d Peso volumétrico seco en campo, en kg/m^3
- wt Contenido de agua en terraplén. en %
- Ss Densidad de sólidos
- e Relación de vacíos
- G Contenido de grava, en %
- S Contenido de arena, en %
- F Contenido de finos, en %
- >3" Tamaño mayores de 3", en %
- N Número de datos
- \bar{X} Promedio

(Ref 8)

TABLA 5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

GPO	Material	G kg/cm ²	K kg/cm ²	ν	E kg/cm ²
1A	Núcleo(1)	55	220	0.3	90
1C		30	240	0.33	80 *
2A		60	190	0.15	135
2C		60	165	0.10	130
5C		60	150	0.07	130
5D		70	190	0.10	150
3A	Filtro(2)	720	2700	0.20	1700
3C		620	1200	0.00	1230
3D		500	1200	0.05	1600
4A	Enrocamiento (4)	500	1170	0.05	1050
4C		350	870	0.07	750
4D		200	465	0.05	420

* El registro correspondiente a las deformaciones es dudosa debido al comportamiento del extensómetro EX

TABLA 6 COMPARACION DE VALORES DE E Y ν

Material	Instrumentación (análisis MEF)		Pruebas de placa confinada
	ν	E kg/cm ²	E [*] kg/cm ²
Núcleo (1)	0.15	120	110
Filtro	0.15	1500	905 **
Transición	0.15	1300	1290
Enrocamiento	0.10	750	850
Pantalla	0.33	4122	***
Aluvión	0.3	750	****

- * Módulo E obtenido a partir de la ν de instrumentación
- ** Módulo E para el filtro arriba de la elev 85
- *** Obtenido de ensayos q_u
- **** Valor estimado de pruebas geofísicas (cross hole)

TABLA 7 PIEZOMETRIA EN EL CORAZON (kg/cm²)

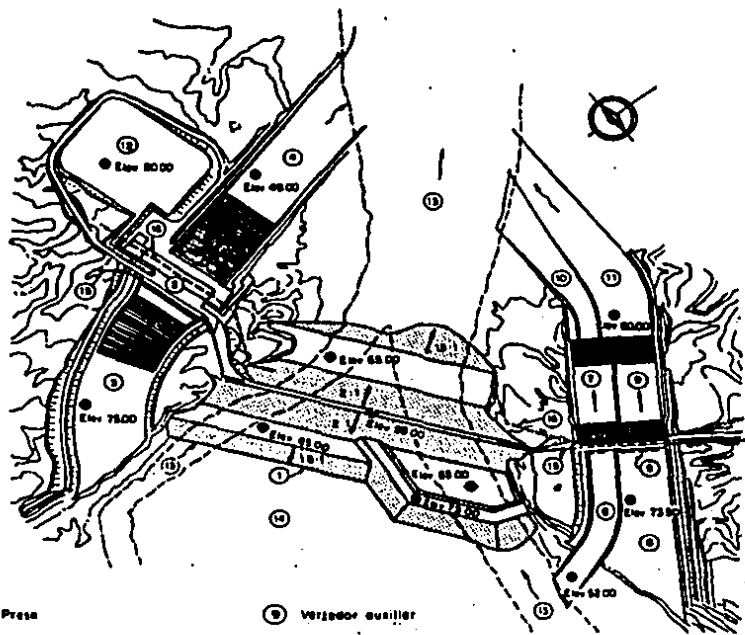
Piezómetro	Sección			Red de flujo
	A	C	D	
1PN1	1.96(?)	2.35(?)	1.83(?)	1.52
1PN2	1.35(!)	2.45(?)	1.53(?)	1.24
2PN1	0.34(!)	1.12(?)	0.22(!)	0.3
2PN2	0.40(?)	0.82(?)	0.14(!)	0.2
5PN1	0.68(!)	0.62(!)	0.56(!)	0.7
5PN2	0.64(?)	0.46(!)	0.58(!)	0.6
PN1	2.45(!)	2.06(?)	2.42(!)	2.58
PN2	0.40(?)	2.52(?)	0.48(?)	1.04
PN4	0.34(!)	0.82(?)	0.53(!)	0.5
PN5	2.90(?)	3.28(x)	2.32(?)	2.03
PN6	1.62(?)	3.45(x)	0.67(?)	0.93

LISTA DE FIGURAS

- Fig 2.1a Planta general del proyecto hidroeléctrico Peñita
Fig 2.1b Sección máxima de la presa
Fig 2.2 Geología regional
Fig 2.3 Vista en planta del sitio de la presa y perfil geológico por los ejes de casa de máquinas y vertedor
Fig 2.4 Carta sísmica del estado de Chiapas
- Fig 3.1 Perfil de suelos típico del aluvión, resistencia a la penetración estándar y resultados de permeabilidad
Fig 3.2 Presiones límite promedio (presiómetro) y resistencia a la penetración del cono Sermes, determinados antes y después de la compactación dinámica
Fig 3.3 Comparación de resultados de pruebas con el cono dinámico CFE, antes y después de la compactación dinámica
Fig 3.4 Ubicación de los impactos de la compactación dinámica
Fig 3.5 Variación del volumen de los cráteres en función de la fase y del equipo de compactación
Fig 3.6 Variación del asentamiento máximo al centro del cráter, en función de la fase y del equipo de compactación
Fig 3.7 Medición del cambio del nivel del agua en un pozo a 25 m del sitio de impactos
Fig 3.8 Croquis de las pantallas defectuosa y definitiva
Fig 3.9 Diseño original de la cortina
Fig 3.10 Cambios al diseño original
Fig 3.11 Cambios al diseño
Fig 3.12 Cambios al diseño
Fig 3.13 Detalle original de la corona
Fig 3.14 Redistribución de los materiales 3 y 4s en el respaldo de aguas arriba
Fig 3.15 Detalle definitivo de la corona
Fig 3.16 Sección máxima definitiva
Fig 3.17 Drenes bajo la plataforma de material 4'
Fig 3.18 Corte a la elev 75.00 para mostrar el filtro colocado entre el enrocamiento 4s y la roca lateral de apoyo aguas abajo
- Fig 4.1 Avance de la construcción (corte transversal)
Fig 4.2 Avance de la construcción (corte longitudinal)
Fig 4.3 Avance de la construcción (tiempo)
Fig 4.4 Curvas de compactación de la arcilla limosa rojiza residual
Fig 4.5 Plasticidad de la arcilla plástica café
Fig 4.6 Plasticidad de la arcilla limosa roja
Fig 4.7 Granulometría especificada del filtro vs. material colocado producto de trituración, arriba de elev 85

- Fig 4.8 Granulometría especificada del filtro vs. material natural colocado
- Fig 4.9 Granulometría especificada del material de transición vs. material colocado
- Fig 4.10 Granulometría especificada del enrocamiento vs. material colocado
- Fig 4.11 Granulometrías de los filtros F₁ y F₂
- Fig 4.12 Curvas granulométricas del terraplén de prueba; arenisca del canal de llamada y de la obra de toma
- Fig 5.1 Diversos extensómetros utilizados en presas de CFE: a) El Infiernillo, b) La Villita y c) en La Angostura, Chicoasén y Peñitas
- Fig 5.2 Nivel hidráulico
- Fig 5.3 Esquema del dispositivo utilizado para efectuar mediciones en celdas de presión
- Fig 5.4 Instrumentación en la presa Peñitas
- Fig 5.5 Distribución tipo de los aparatos que conforman un grupo y su orientación.
- Fig 5.6 Instalación de piezómetros en la cimentación
- Fig 6.1 Evolución piezométrica en función de la construcción de la pantalla
- Fig 6.2 Diferencia de niveles piezométricos (eficiencia de la pantalla)
- Fig 6.3 Red de flujo en la cimentación sin pantalla
- Fig 6.4 Trayectorias de esfuerzos en el material del corazón
- Fig 6.5 Curvas ϵ vs. σ (A) y γ vs. τ (B)
- Fig 6.6 Colocación final del material impermeable, sección longitudinal
- Fig 6.7 Corte longitudinal a través de la zona de prueba
- Fig 6.8 Plataforma metálica y rampas de acceso a la plataforma
- Fig 6.9 Vectores de desplazamiento (M.E.F.)
- Fig 6.10 Configuración de esfuerzos verticales (M.E.F.)
- Fig 6.11 Asentamiento durante construcción (20,julio,86) sección A
- Fig 6.12 Asentamiento durante construcción (20,julio,86) sección C
- Fig 6.13 Asentamiento vs. elevación durante construcción (20,julio,86) sección D
- Fig 6.14 Asentamientos, sección A
- Fig 6.15 Asentamientos, sección C
- Fig 6.16 Asentamientos, sección D
- Fig 6.17 Asentamientos medidos vs. asentamientos calculados (antes del llenado)
- Fig 6.18 Desplazamientos horizontales (antes del llenado) sección A
- Fig 6.19 Desplazamientos horizontales (antes del llenado) sección C
- Fig 6.20 Desplazamientos horizontales (antes del llenado) sección D
- Fig 6.21 Desplazamientos horizontales (antes del llenado) sección B

- Fig 6.22 Distribución de asentamientos y esfuerzos
verticales en un silo
- Fig 6.23 Distribución de esfuerzos verticales efectivos en
el corazón
- Fig 6.24 Esfuerzos verticales medidos vs. calculados
- Fig 6.25 Trayectorias de esfuerzos totales de ensayos
triaxiales consolidados no drenados (CU) y de campo
- Fig 6.26 Zonas plastificadas
- Fig 6.27 Red de flujo



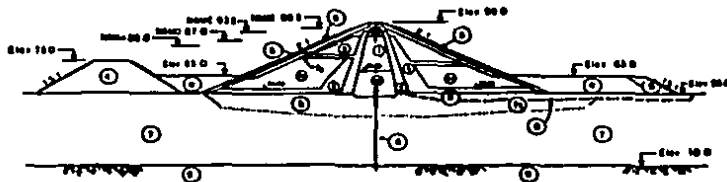
- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| ① Presa | ⑨ Vertedor auxiliar |
| ② Casa de máquinas | ⑩ Descarga desvío |
| ③ Canal de flujada | ⑪ Descarga vertedor |
| ④ Canal de desfogue | ⑫ Subestación |
| ⑤ Compartes de vertedores | ⑬ Río Grijalva |
| ⑥ Canal de flujada desvío | ⑭ Isla |
| ⑦ Vertedor de servicio | ⑮ Pantalla de inyección |
| ⑧ Canal de flujada vertedor | ⑯ Pantalla de drenaje |

0 50 100 200 300 m

Elev. Elevación, en m

Fig 2.1a Planta general del proyecto hidroeléctrico Peñitas

Ref 5



- | | |
|---|--|
| Elev. Elevación, en m | ② Entrecamión de desperdicio |
| ④ Pantalla impermeable de concreto plástico | ⑤ Entrecamión a volutas |
| ⑧ Perfil del terreno natural | ⑥ Entrecamión de gran lamela |
| ① Malla de acero | ⑦ Depósito estival |
| ② Filtro | ⑪ Aljibe compactado dinámicamente |
| ③ Transición | ⑧ Releno del coque con grava-menuda limpia (tratamiento de composición dinámica) |
| ④ Entrecamión compactado | ⑨ Lente |

Fig 2.1b Sección máxima de la presa

Ref 5

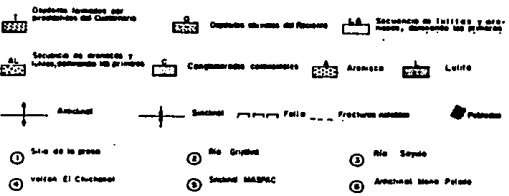
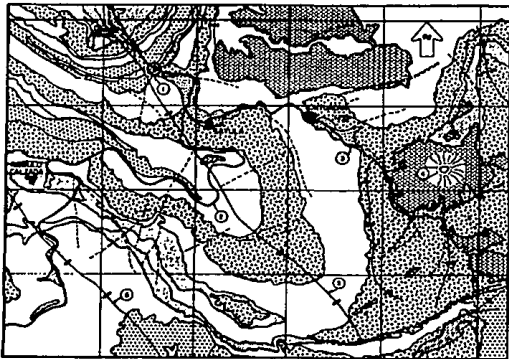
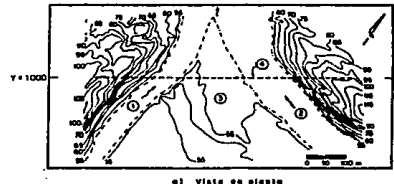
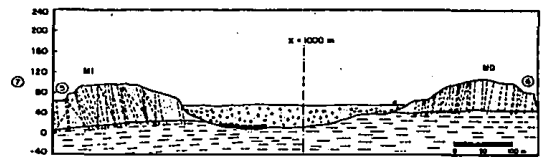


Fig. 2.2 Geología regional Ref 5



a) Vista en planta



b) Geología del sitio de la presa

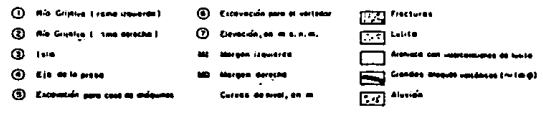


Fig. 2.3 Vista en planta del sitio de la presa y perfil geológico por los ejes de casa de máquinas, Cortina y vertedor Ref 5

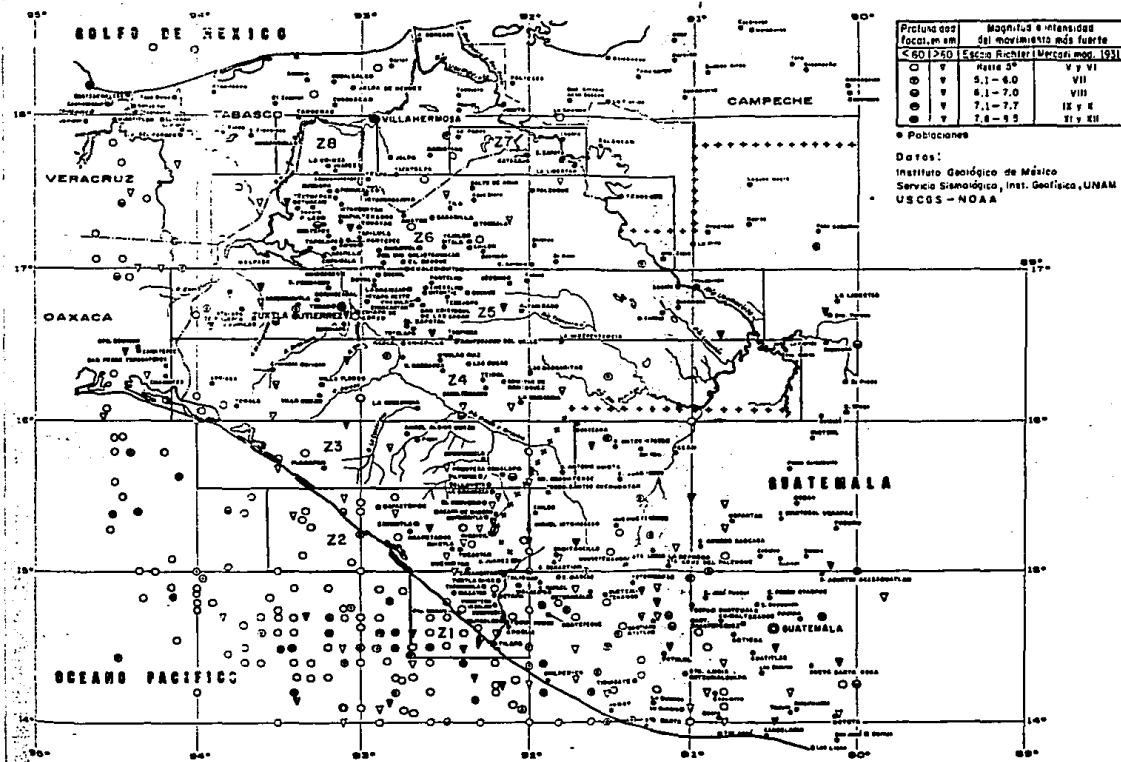
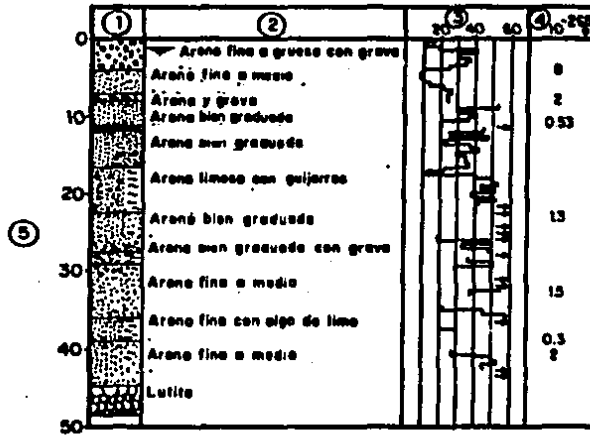


Fig. 2.4 Carta sísmica del estado de Chiapas

Datos reunidos hasta marzo de 1973 (J. Figueroa A., Instituto de Ingeniería, UNAM)

Sondeo SPE-2 sobre el eje de la cortina



- ① Perfil de suelos ② Clasificación ③ Número de golpes
- ④ Coeficiente de permeabilidad determinado en un sitio cercano
- ⑤ Profundidad, en m → No de golpes > 60

Fig. 3.1. Perfil de suelos típico del aluvión, resistencia a la penetración estándar y resultados de pruebas de permeabilidad Lefranc.

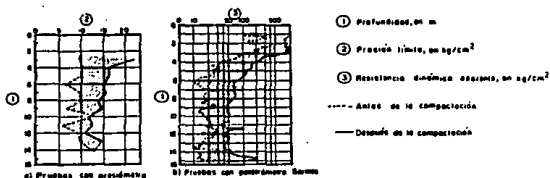


Fig. 3.2 Presiones límite promedio (presímetro) y resistencias a la penetración del cono Sármas, determinadas antes y después de la compactación dinámica. Ref 5

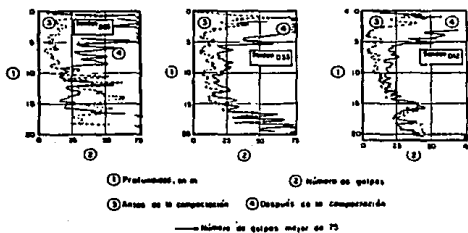


Fig. 3.3 Comparación de resultados de pruebas con el cono Sármas CFE, antes y después de la compactación dinámica. Ref 5

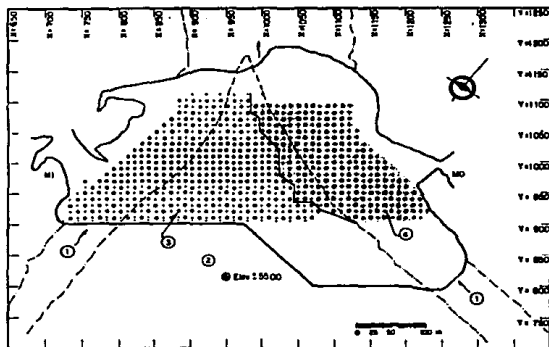


Fig. 3.4 Ubicación de las inyecciones de la compactación dinámica. Ref 5

	1o. etapa MI	2o. etapa MD
1a. fase : triécula	○	○
2a. fase : triécula	●	●
3a. fase : drécula	+	+
3a. fase : triécula	●	●

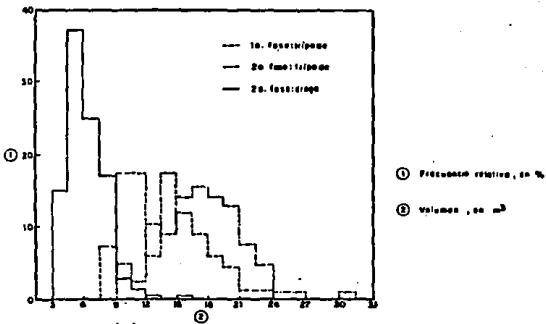


Fig. 3.5. Variación del máximo de los criterios en función de las fases y del equipo de compactación. Ref. 5

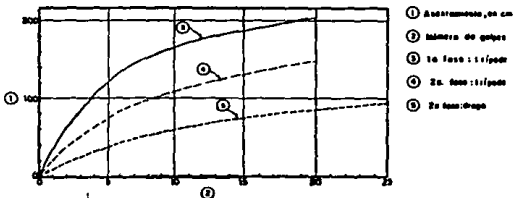


Fig. 3.6. Variación del asentamiento máximo en el centro del núcleo, en función de la fase y del equipo de compactación. Ref. 5

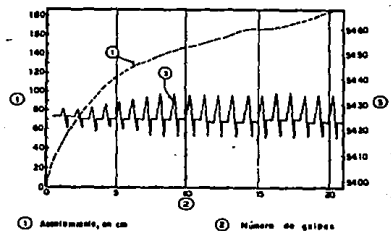
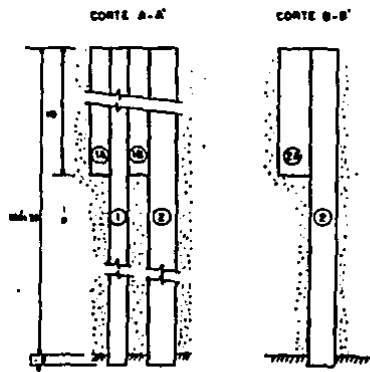
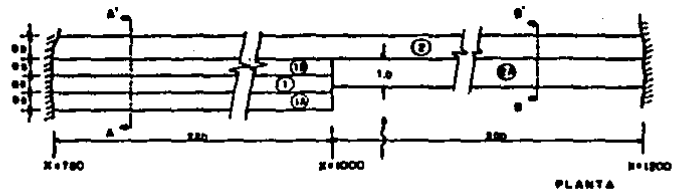


Fig. 3.7. Medición del cambio del nivel del agua en un punto a 25 m del eje de impactos. Ref. 5



- ① Paredes defectuosas de mortero plástico
 - ①a Paredes apoyando espiga arriba
 - ①b Paredes apoyando espiga abajo
 - ② Paredes de mortero plástico definitivo
 - ②a Cabeceros de la pared
- Asertaciones, en m
- Alcornoque
 - Pase

Fig 3.8 Croquis de las paredes defectuosas y definitiva Ref 5

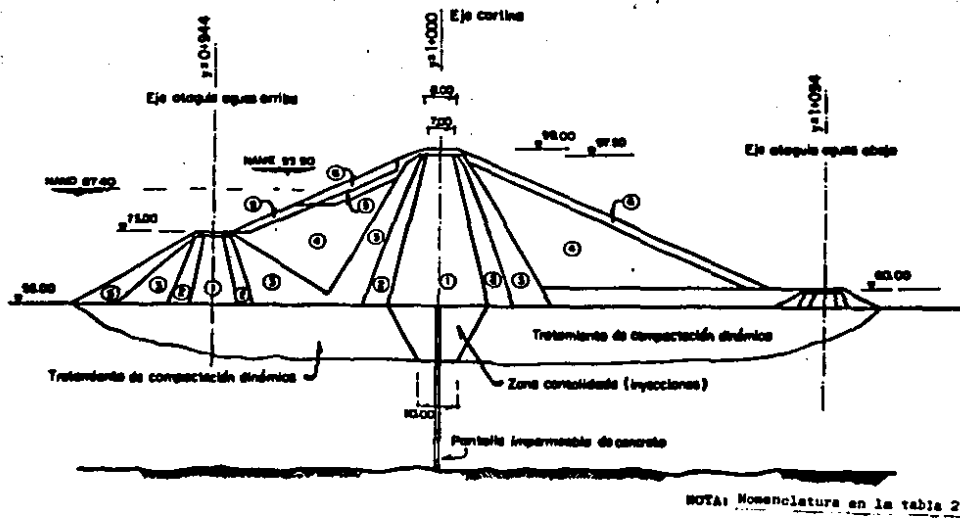


Fig. 3.9 Diseño original de la cortina Ref. 8

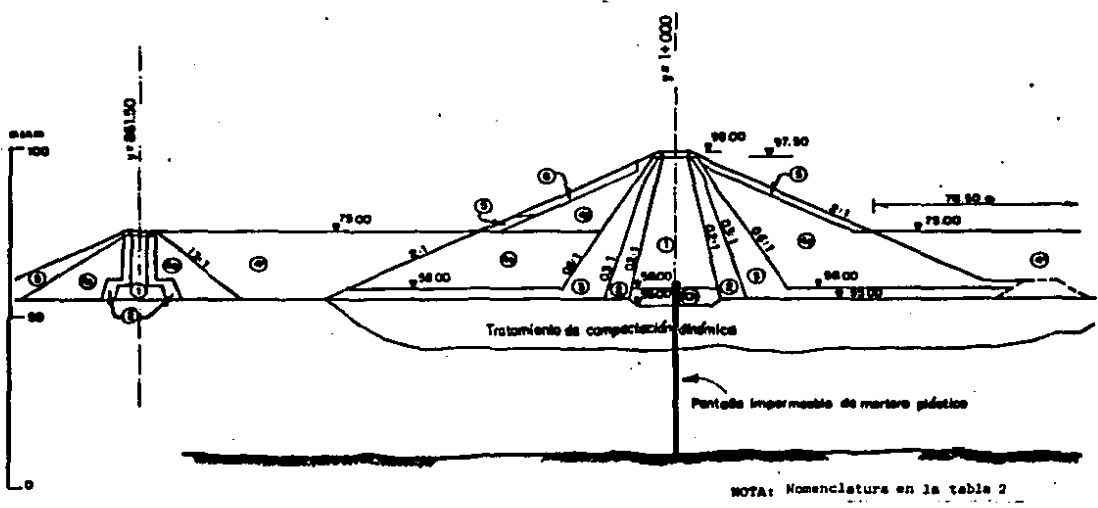
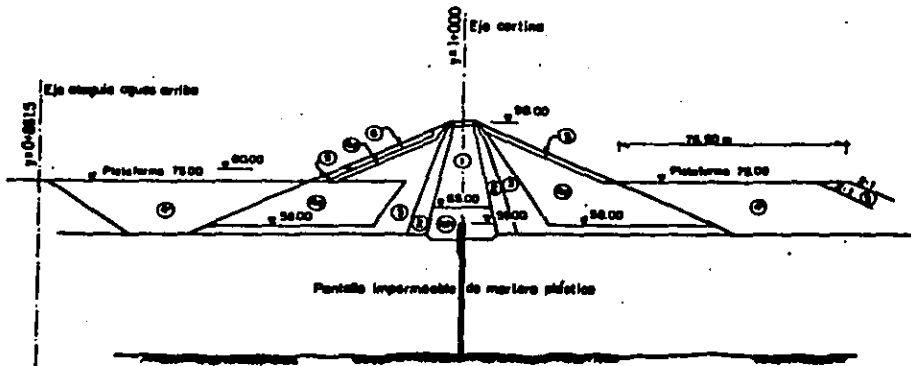


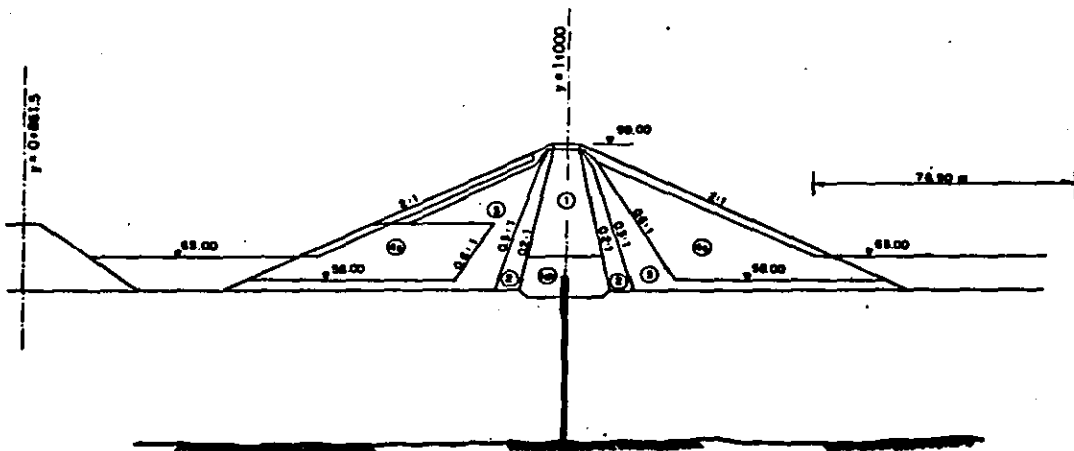
Fig. 3.10. Cambios al diseño: pantalla plástica por pantalla de concreto, separación de las alaguas del cuerpo de la cortina, pantalla empotrada en el corazón de arcilla e inclusión del material 3ch principalmente. Ref. 8



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

Fig. 3.11. Cambios al diseño: redistribución de los materiales de los respaldos e incremento del espesor del material 1ch.

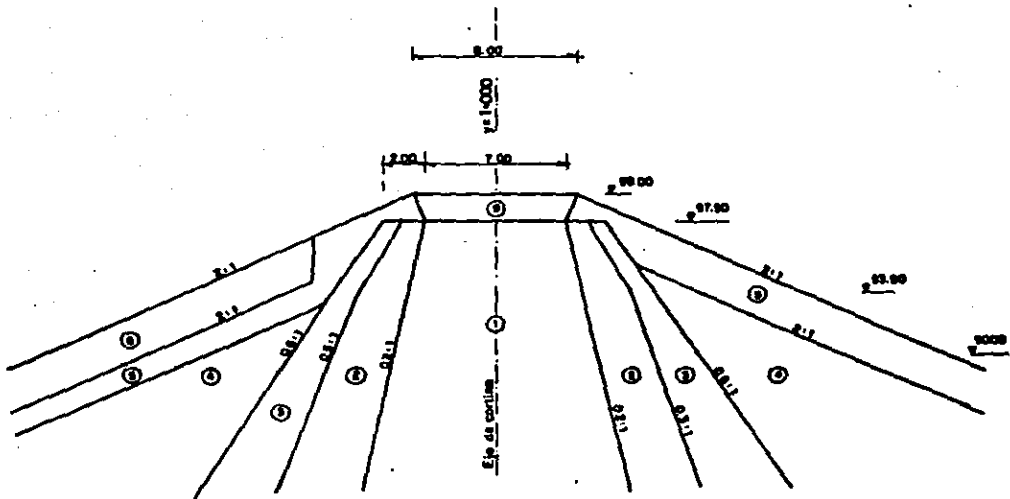
Ref 9



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

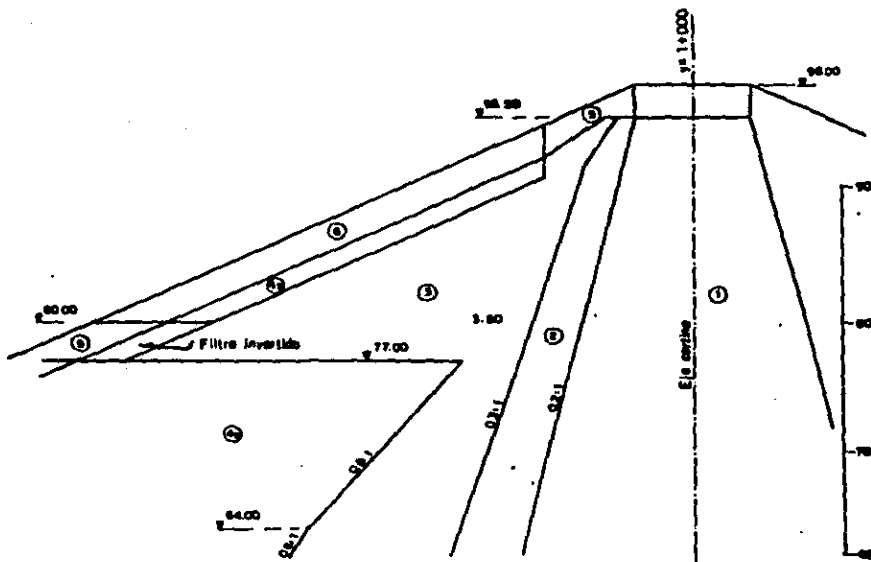
Fig. 3.12. Cambios al diseño: disminución de la elevación de las plataformas, de la elevación 75 a la elevación 65.

Ref 9



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

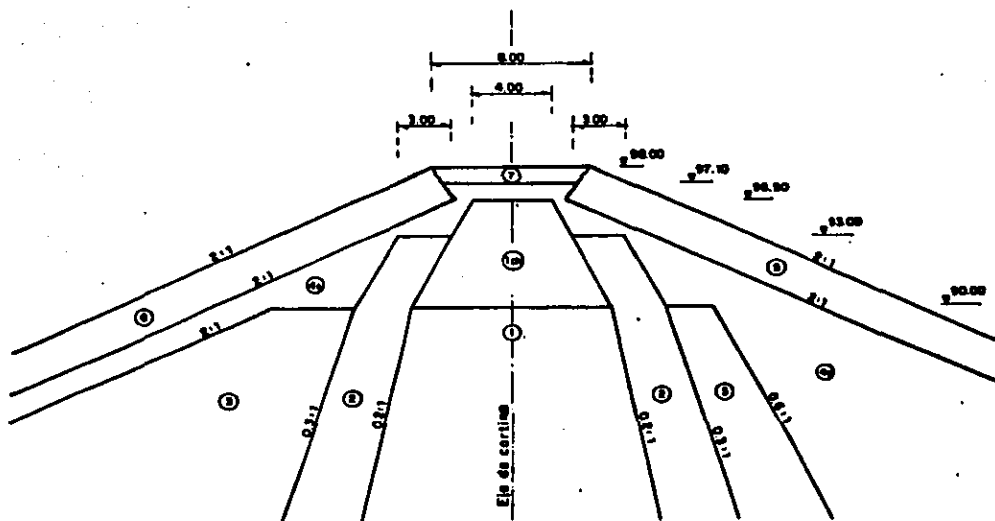
Fig 3.13 Detalle original de la corona Ref 8



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

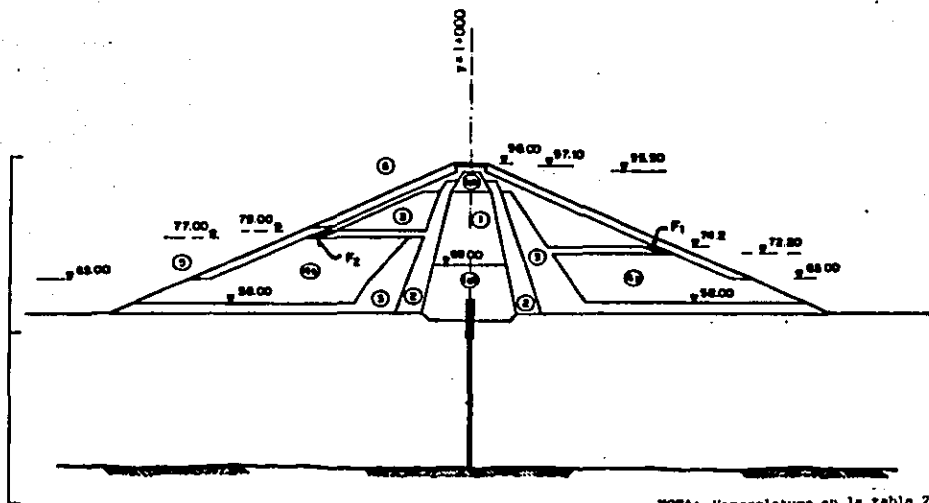
Fig.3.14 Redistribución de los materiales 3 y 4e en el respaldo de aguas arriba

Ref 8



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

Fig 3.15 Detalle definitivo de la corona Ref 8



NOTA: Nomenclatura en la tabla 2

Fig 3.16 Sección máxima definitiva Ref 8

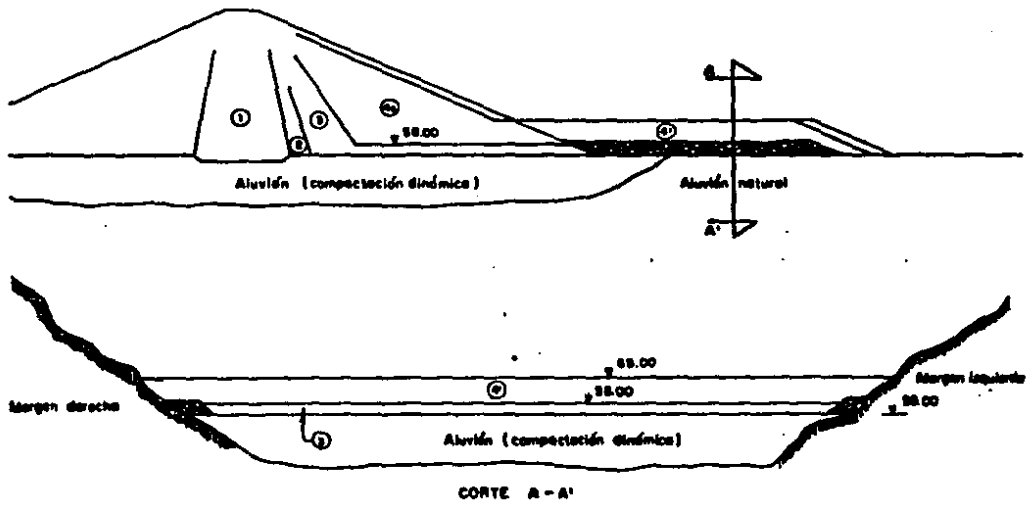


Fig 3.17 Drenes bajo la plataforma de material 4' Ref B

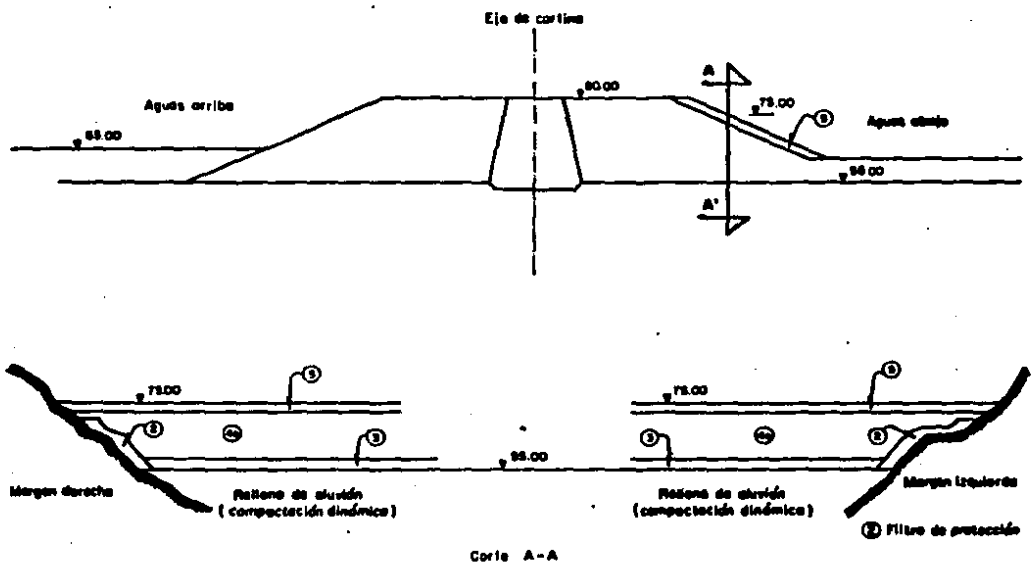


Fig 3.18 Corte a la elev 75.00 para mostrar el filtro colocado entre el enrocamiento 4s y la roca lateral de apoyo aguas abajo Ref B

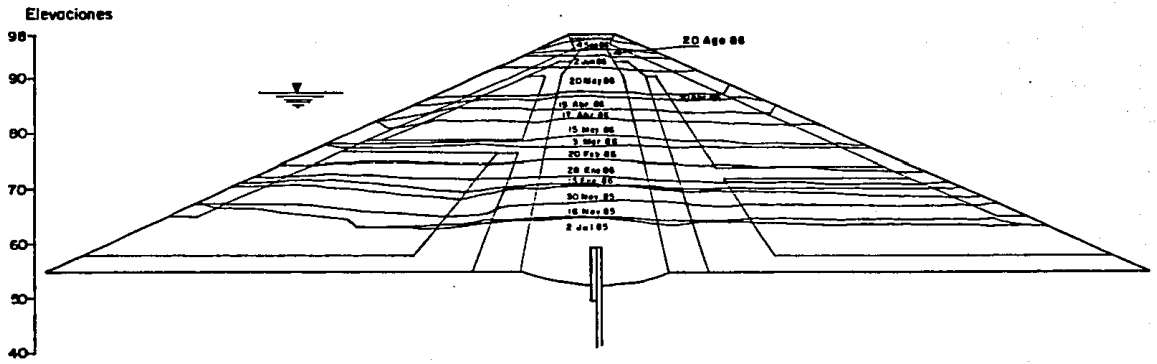


Fig 4 . 1 Avance de la construcción de la cortina (Corte transversal)

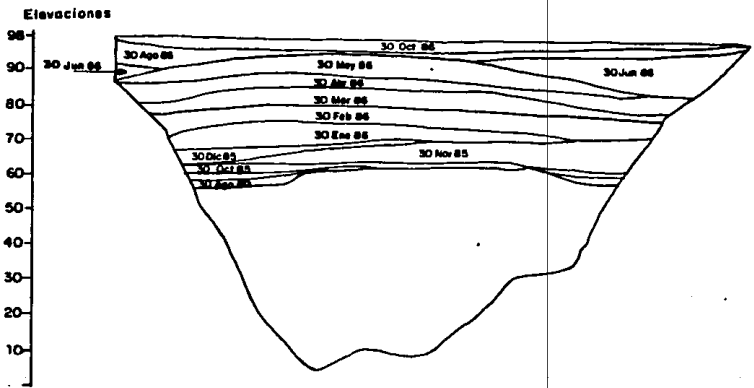


Fig 4 .2 Avance de la construcción de la cortina (Corte Longitudinal)

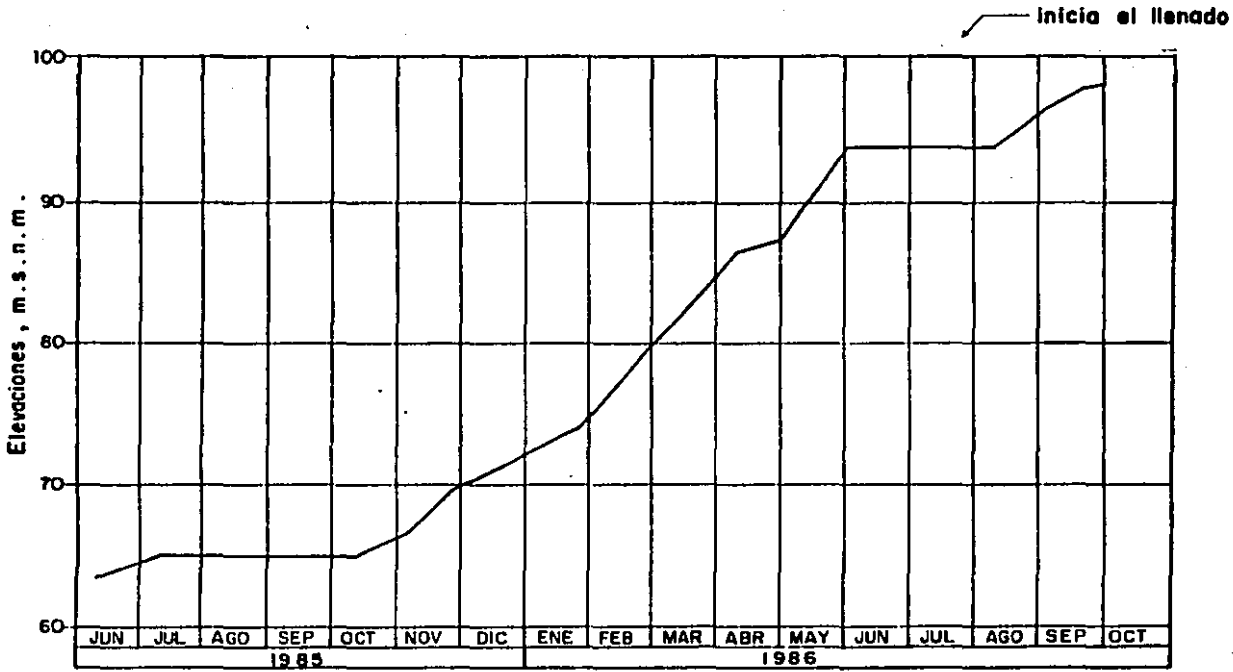
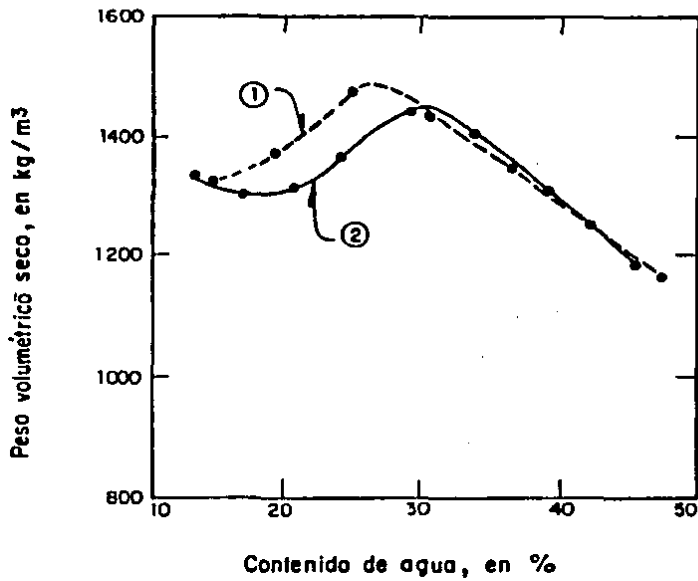


Fig. 4 3 Avance de la construcción de la cortina



① Material con $w_i = 14.7\%$

② Material con $w_i = 34.1\%$

w_i contenido de agua inicial para prueba Proctor

Fig. 4 4 Curvas de compactación de la arcilla limosa rojiza residual.

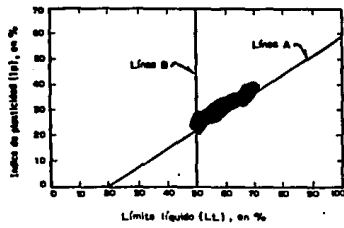


Fig 4.5 Plasticidad de la arcilla plástica color

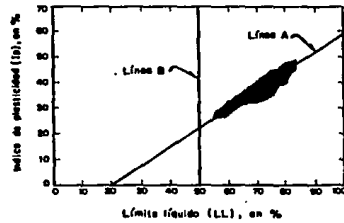


Fig 4.6 Plasticidad de la arcilla limosa rojo

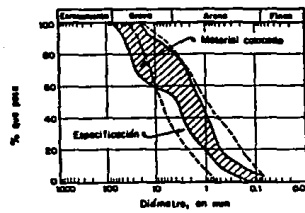


Fig 4.7 Filtro granulométrico especificado vs. material colocado natural hasta elev 85

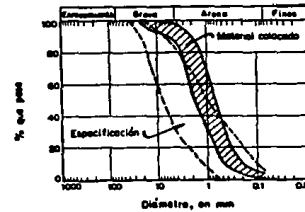


Fig 4.8 Filtro granulométrico especificado vs. material colocado producto de trituración arriba elev 85

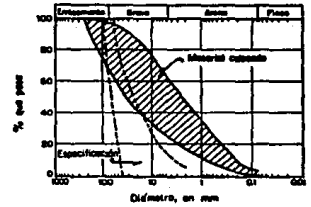


Fig 4.9 Trazado granulométrico especificado vs. material colocado

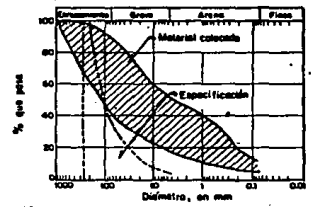


Fig 4.10 Enrocamiento granulométrico especificado vs. material colocado

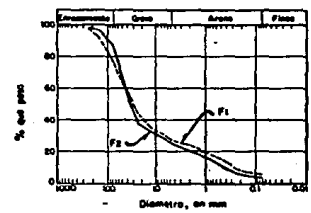


Fig 4.11 Granulometría de los filtros invertidos F1 y F2

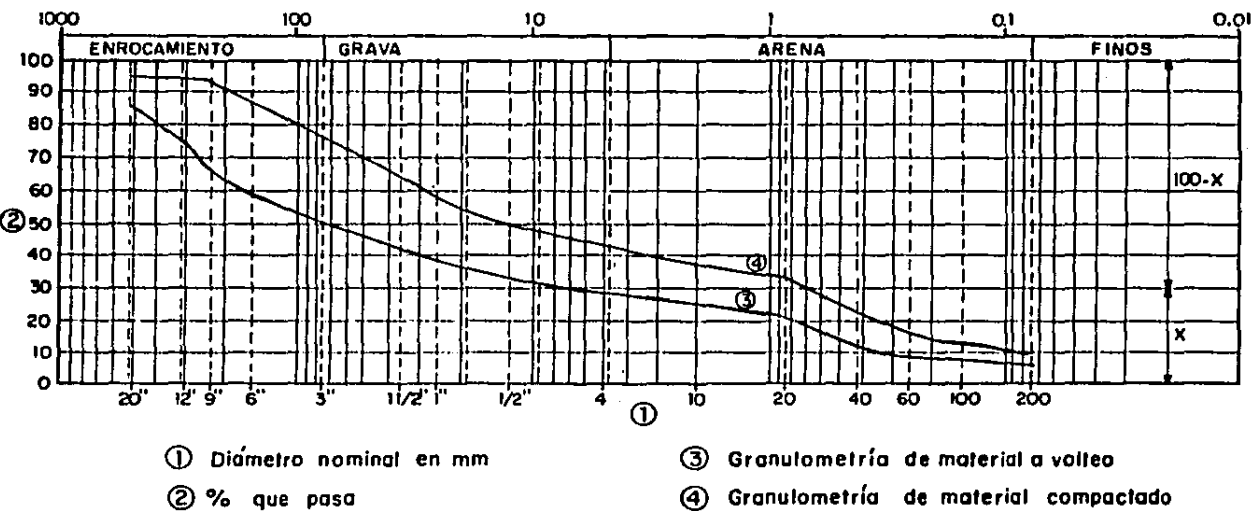


Fig 4.12 Curvas granulométricas del terraplén de prueba ; areniscas del canal de llamada y de la obra de toma .

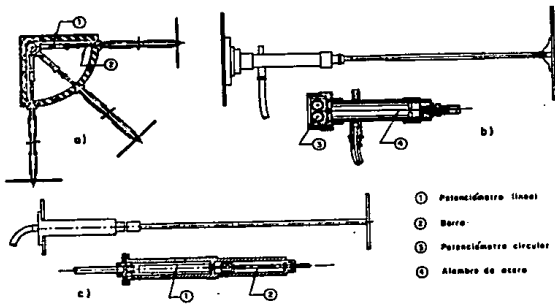
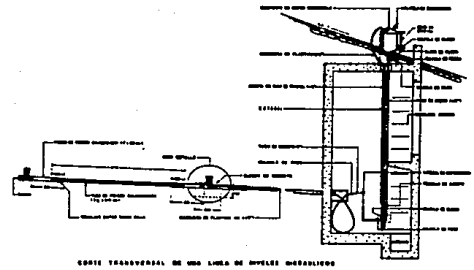
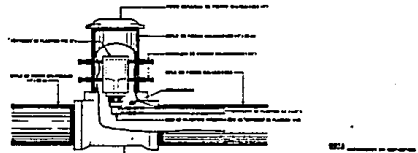


Fig 5.1 Diversos extensómetros utilizados en presas de CFE:
a) El Infinito; b) La Villita; c) La Angostura Chicoasán y Peñitas

Ref 5



CORTE TRANSVERSAL DE UN NIVEL METALICO



DETALLES CONSTRUCTIVOS DE UN NIVEL METALICO

Fig 5a.2 Nivel hidráulico

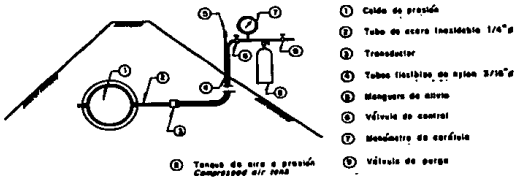
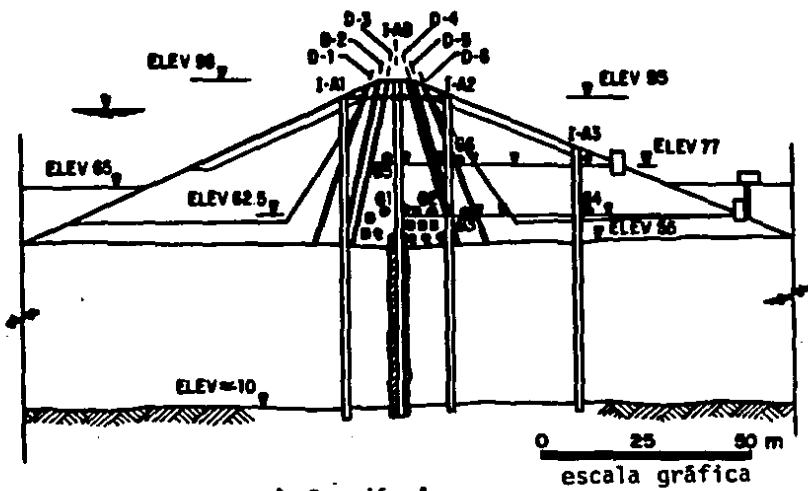


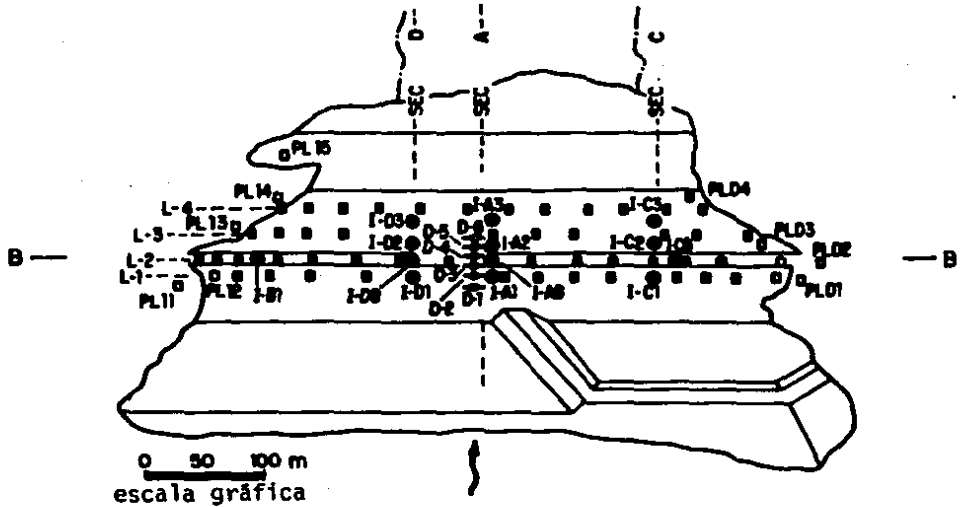
Fig 5.3 Esquema del dispositivo utilizado para efectuar mediciones en celdas de presión

Ref 5



a) Sección A

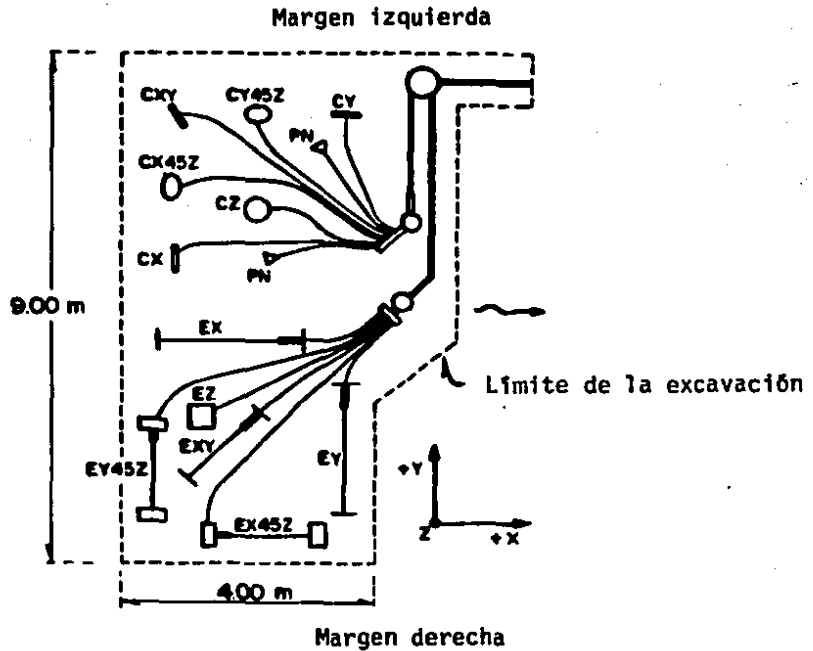
escala gráfica



b) Vista en planta

- | | |
|----------------------------------|----------------------|
| □ Piezómetros abiertos PLDi, DLi | □ Caseta de medición |
| ∇ Niveles hidráulicos | ● Inclinómetros I-i |
| ■ Mojoneras en línea L-1 | ◊ Deformómetros D-i |
| ● Grupos de instrumentos | ● Celdas de presión |
| ■ Piezómetros neumáticos | → Extensómetros |

Fig 5.4 Instrumentación en la presa Peñañitas



CELDA DE PRESION	EXTENSOMETROS	COSENO DIRECTORES		
		α	β	γ
CX	EX	1	0	0
CY	EY	0	1	0
CZ	EZ	0	0	1
CX45Z	EX45Z	$1/\sqrt{2}$	0	$1/\sqrt{2}$
CY45Z	EY45Z	0	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
CKY	EXY	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0

Fig 5.5 Distribución tipo de los aparatos que conforman un grupo y su orientación

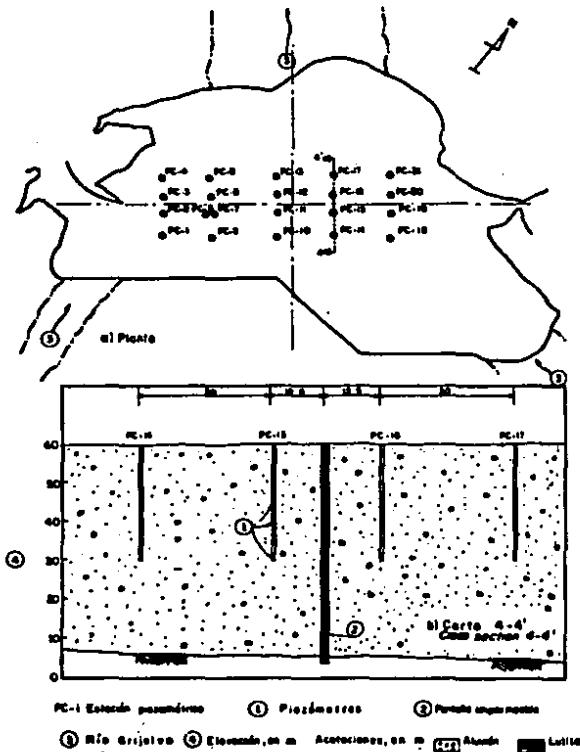


Fig 5.6. Instalación de piezómetros en la cementación

- ① Diferencia de niveles, en m
- ② Avance en la construcción de la pantalla, en %
- ③ Río arriba - río abajo
- ④ PC 14 - PC 17
- ⑤ PC 15 - PC 16
- PCL Piezómetros tipo Casagrande

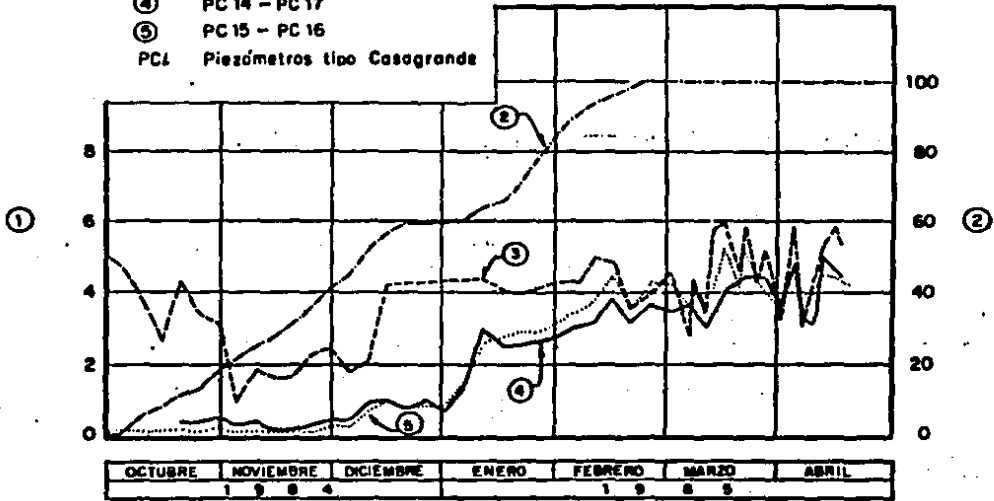
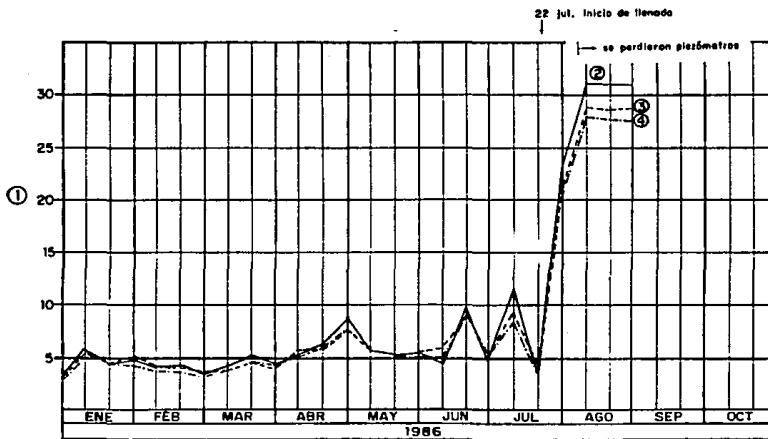


Fig 6.1 Evolución piezométrica en función de la construcción de la pantalla



- ① Diferencia de niveles
- ② Río arriba - río abajo
- ③ Doble pantalla PC 1-PC4, PC2-PC3, PC5-PC9, PC7-PC8, PC10-PC13, PC11-PC12
- ④ Pantalla Simple PC14-PC17, PC15-PC16, PC18-PC21, PC19-PC20

Fig 6 2 Diferencia de niveles piezométricos

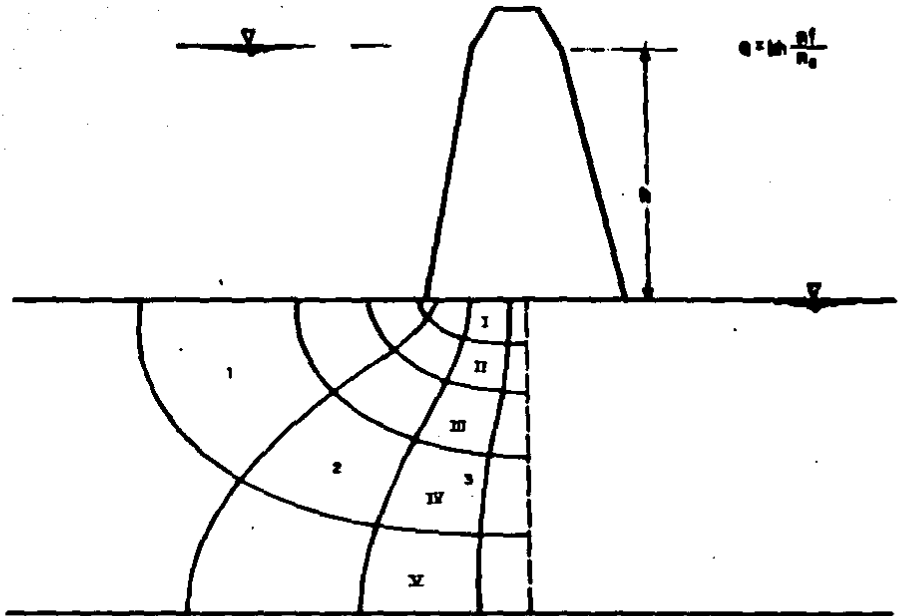
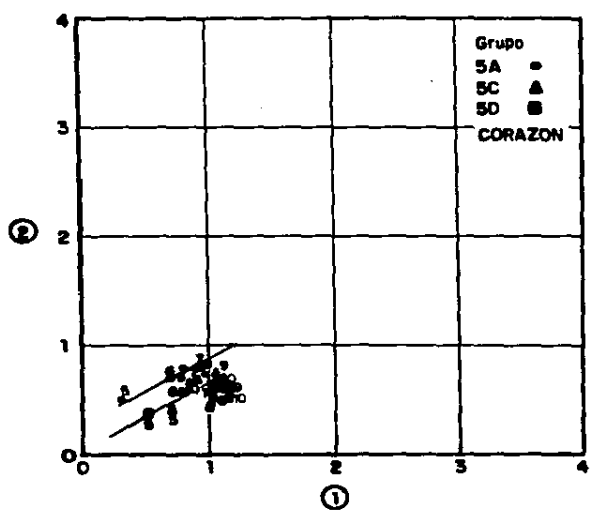
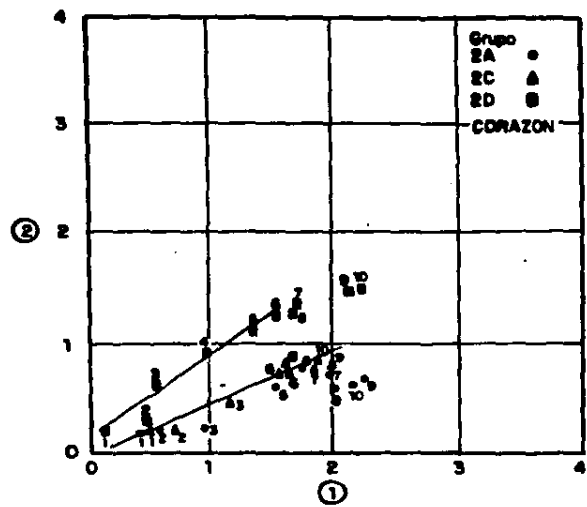
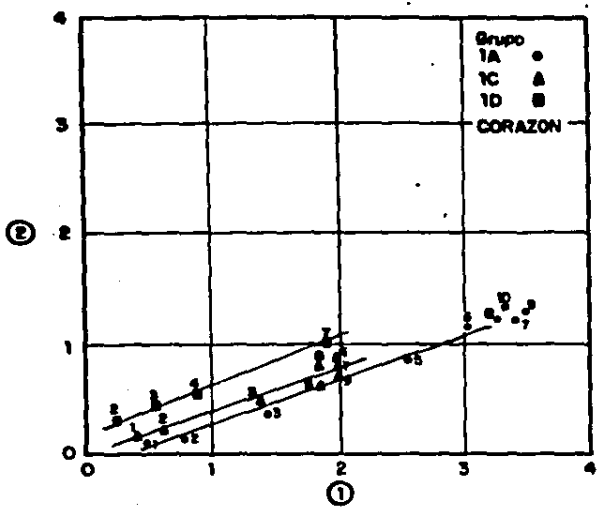


Fig 6.3 Red de flujo en la cimentación sin pantalla



① $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, en kg/cm²

② $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, en kg/cm²

PUNTO	FECHA
1	20-Sep-85
2	1-Nov-85
3	10-Dic-85
4	20-Ene-86
5	1-Mar-86
6	10-Abr-86
7	1-Jun-86
8	20-Jul-86
9	1-Sep-86
10	10-Oct-86

Fig 6.4 Trayectorias de esfuerzos en el material del corazón (curvas p vs. q)

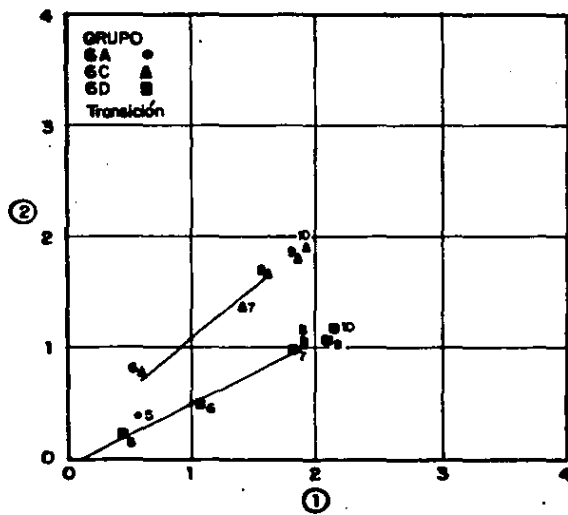
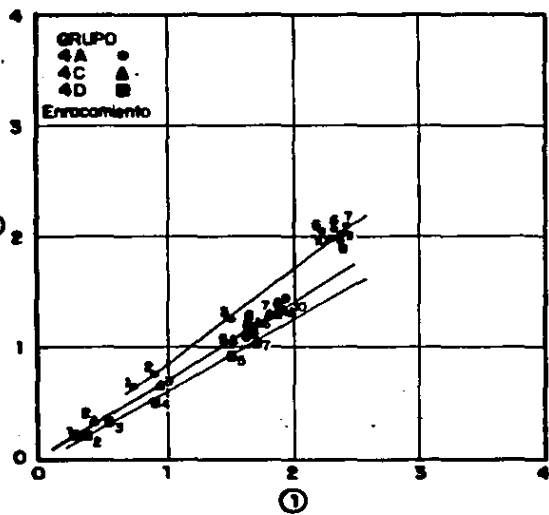
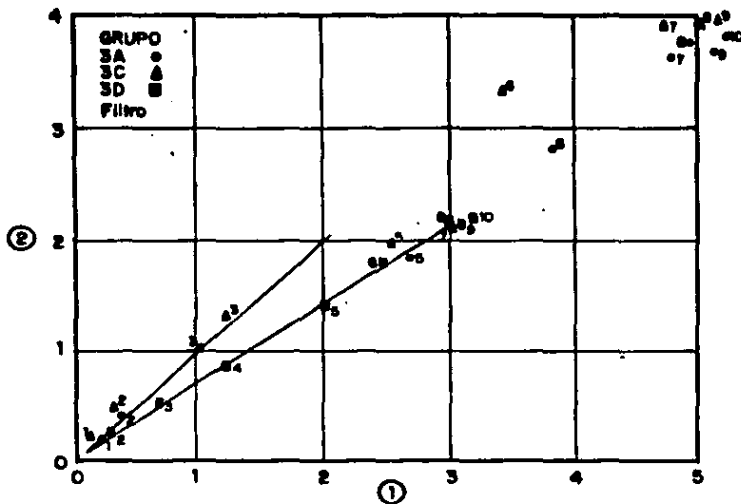
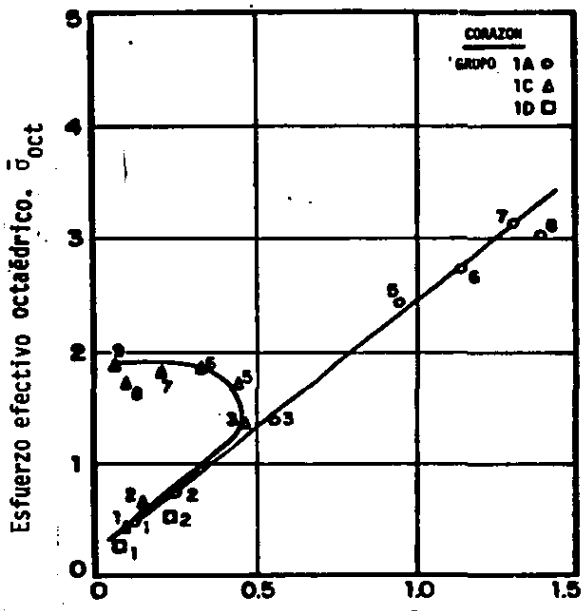


Fig 6.4 Trayectorias de esfuerzos (continuación)



Punto	Fecha
1	20 sep 85
2	1 nov 85
3	10 dic 85
4	20 ene 86
5	1 mar 86
6	10 abr 86
7	1 jun 86
8	20 jul 86
9	1 sep 86
10	1 oct 86

↓ Altura final del terraplén

Deformación lineal octaédrica, ϵ_{oct}

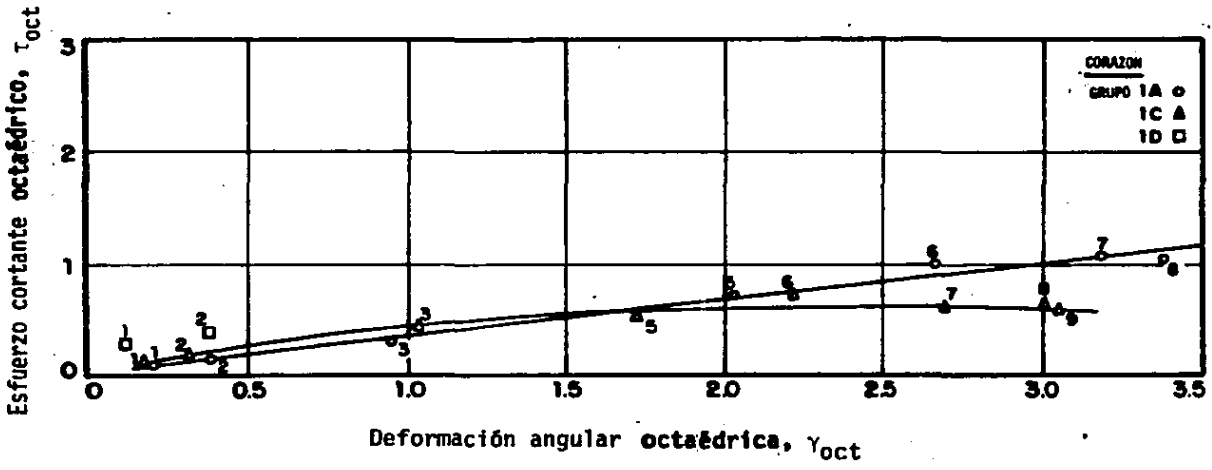


Fig 6.5 Curvas σ_{oct} vs. ϵ_{oct} y τ_{oct} vs. γ_{oct}

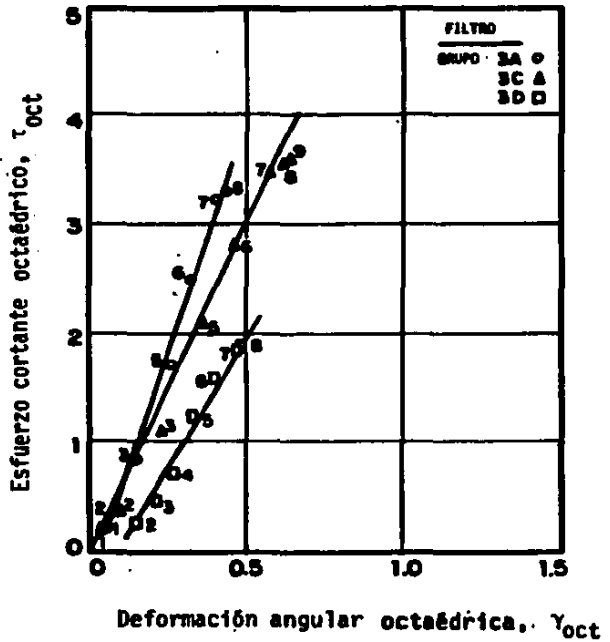
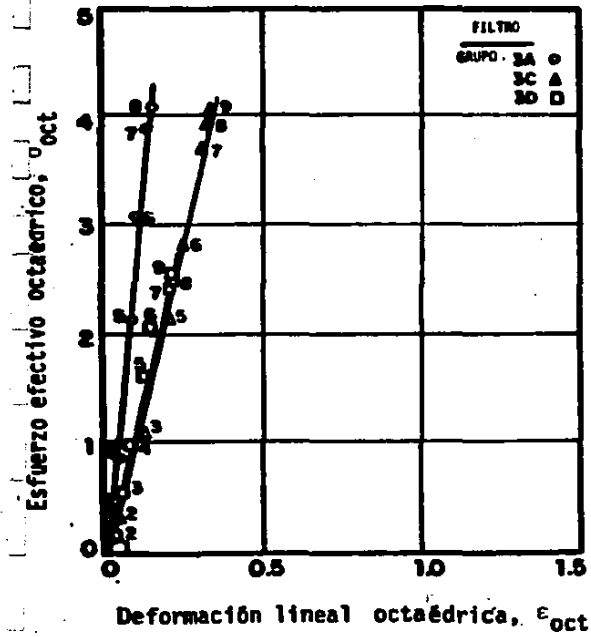
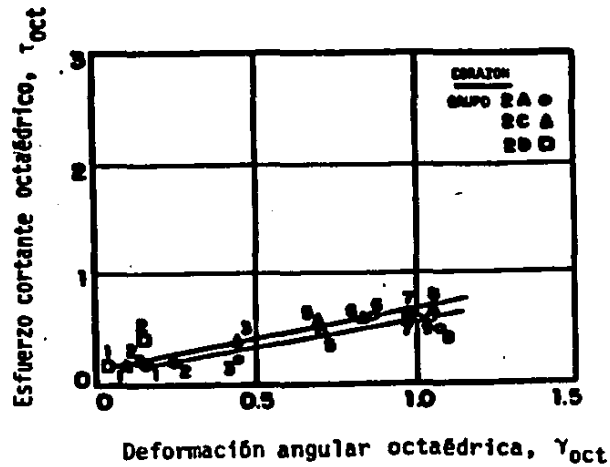
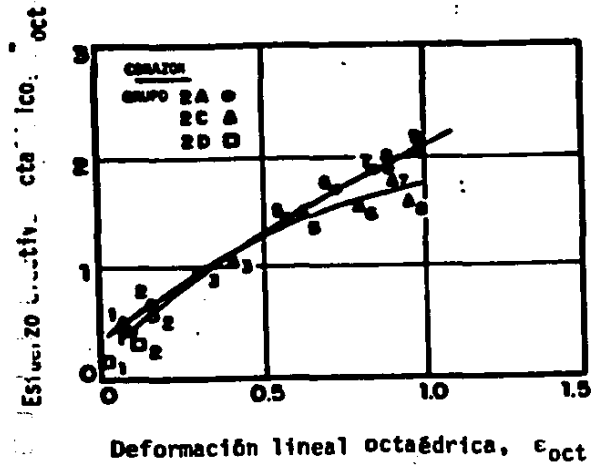
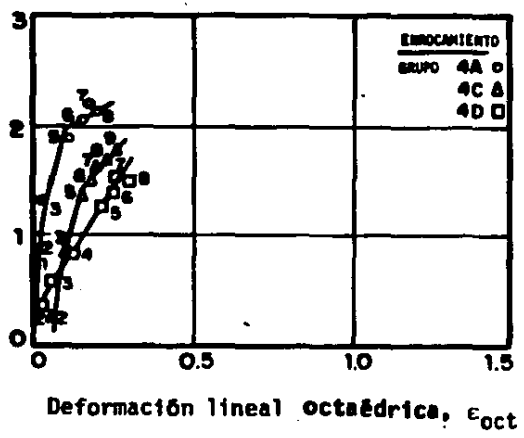
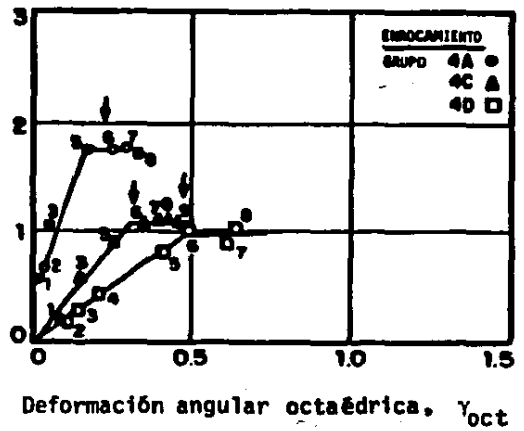


Fig 6.5 (continuación)

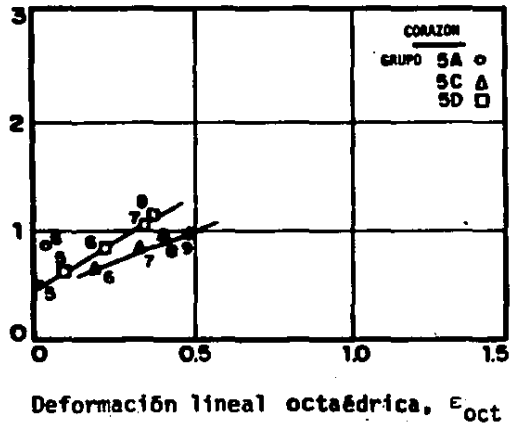
Esfuerzo efectivo octaédrico, σ_{oct}



Esfuerzo cortante octaédrico, τ_{oct}



Esfuerzo efectivo octaédrico, σ_{oct}



Esfuerzo cortante octaédrico, τ_{oct}

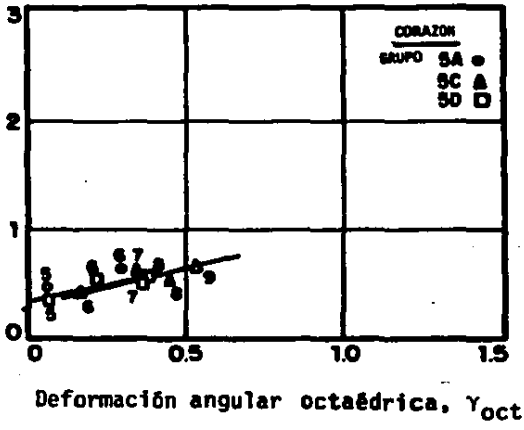


Fig 6.5 (continuación)

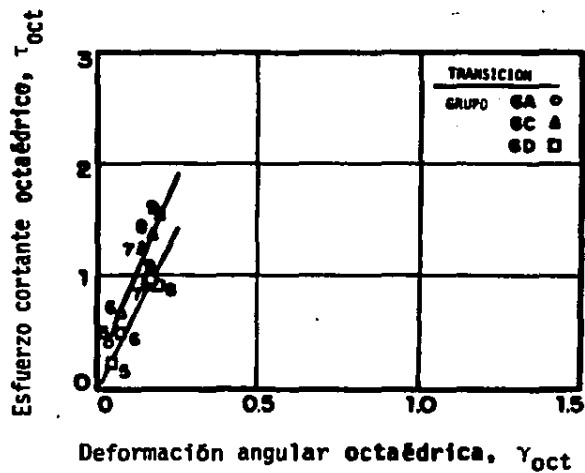
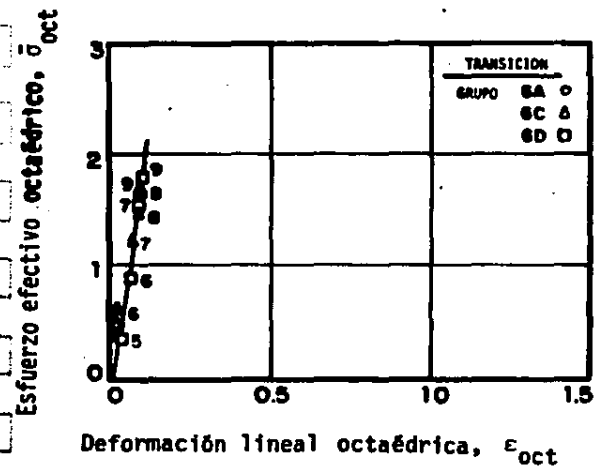


Fig 6.5 (continuación)

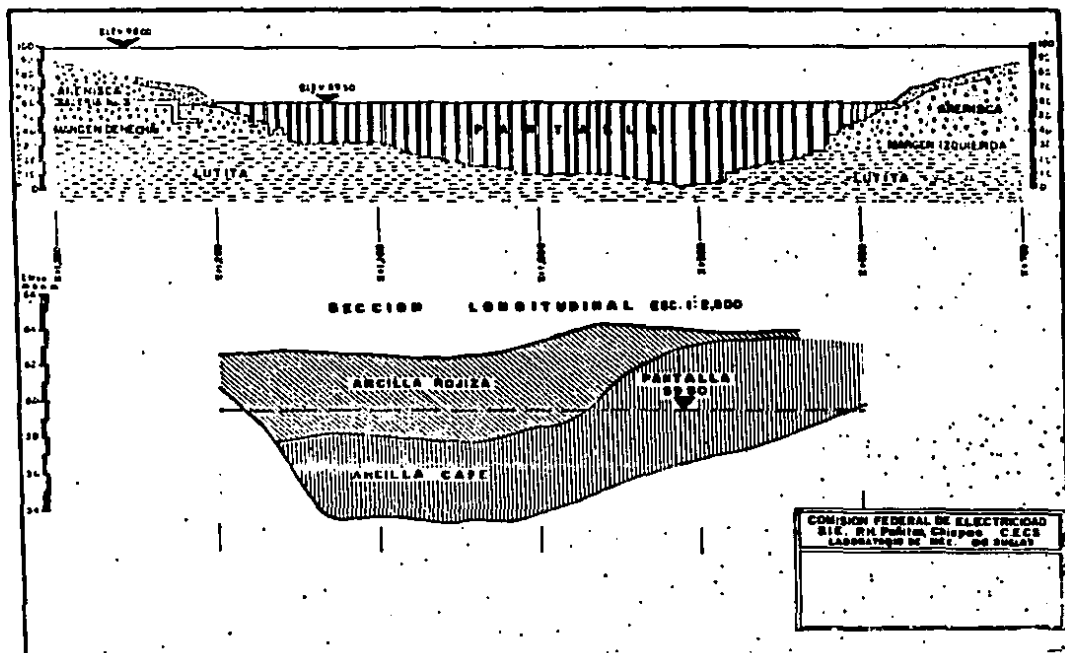


Fig 6.6 Colocación final del material impermeable, sección longitudinal

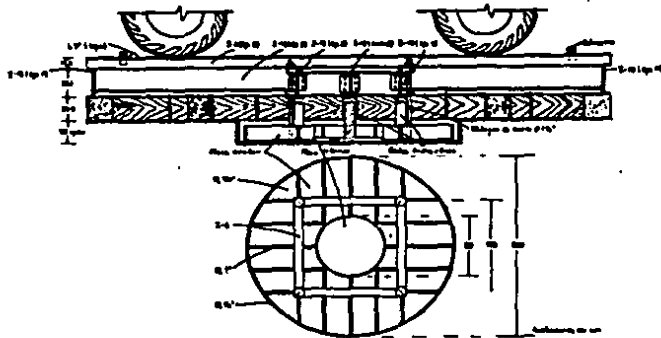


Fig 6.7 Corte longitudinal a través de la zona de prueba

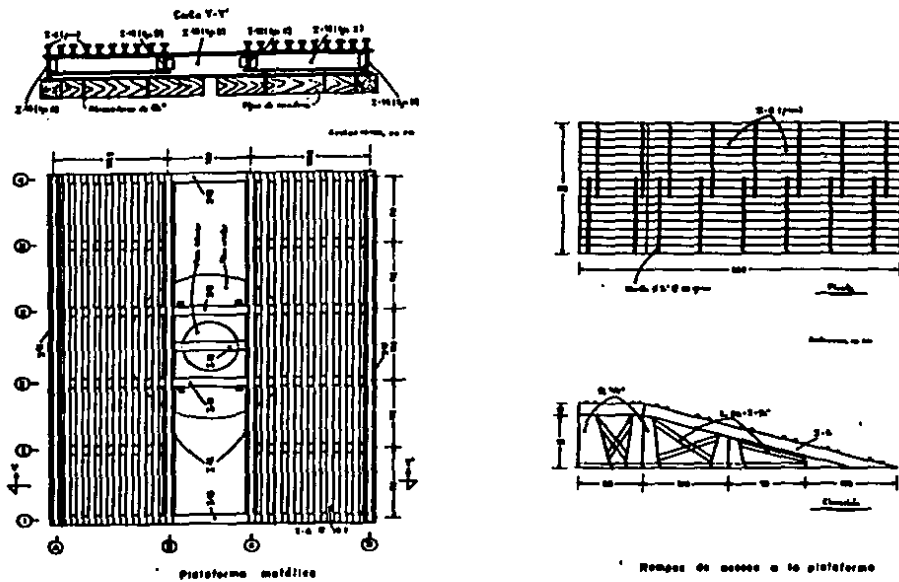


Fig 6.8 Plataforma metálica y rampas de acceso a la plataforma

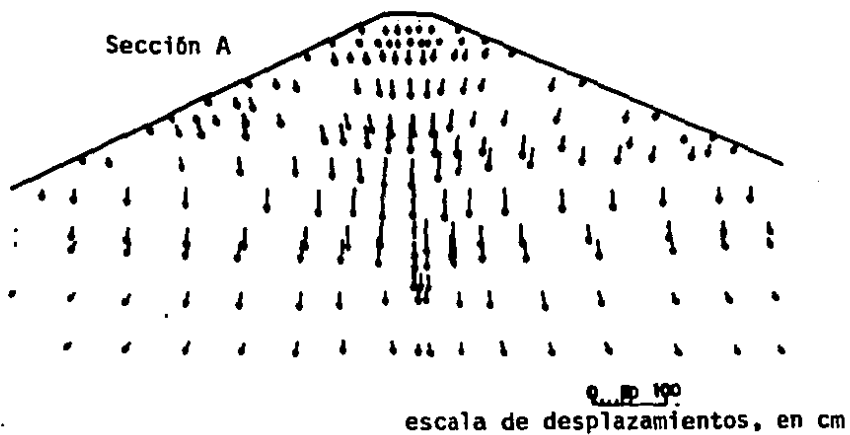


Fig 6.9 Vectores de desplazamiento (M.E.F.)

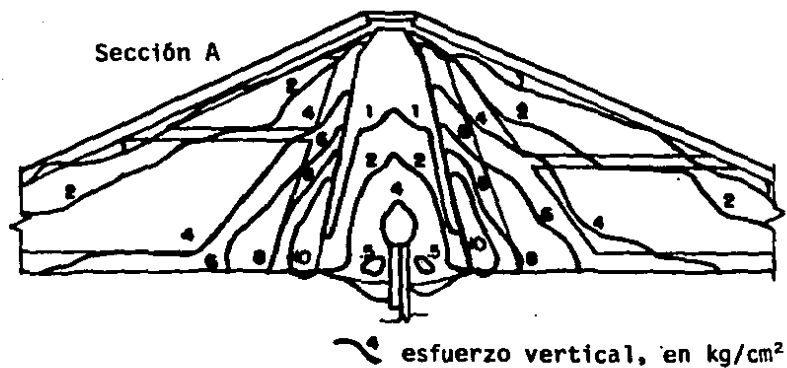


Fig 6.10 Configuración de esfuerzos verticales (M.E.F.)

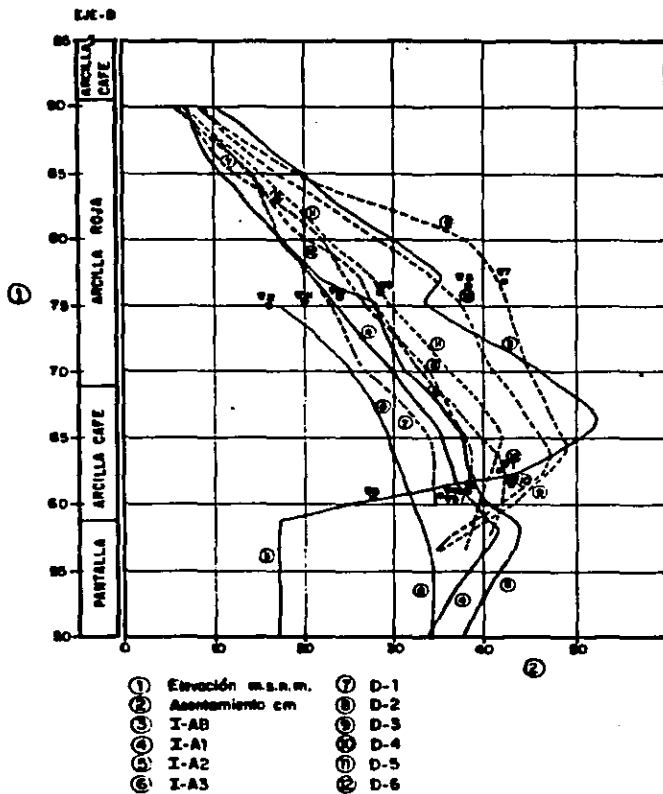
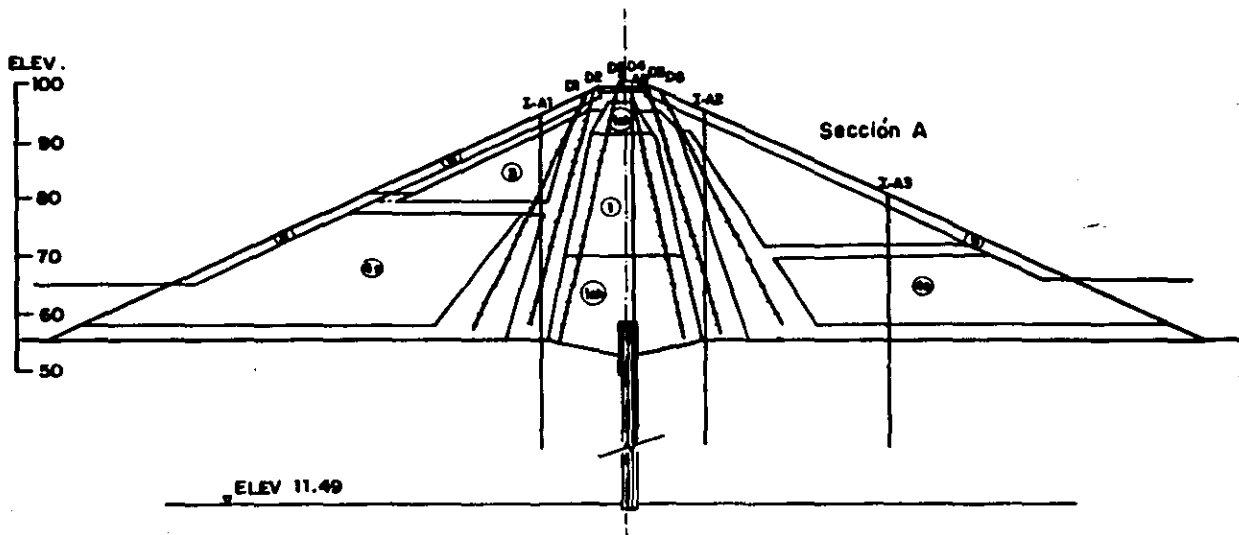


Fig 6.11 Asentamientos durante construcción, fecha 20 julio 86
Sección A'

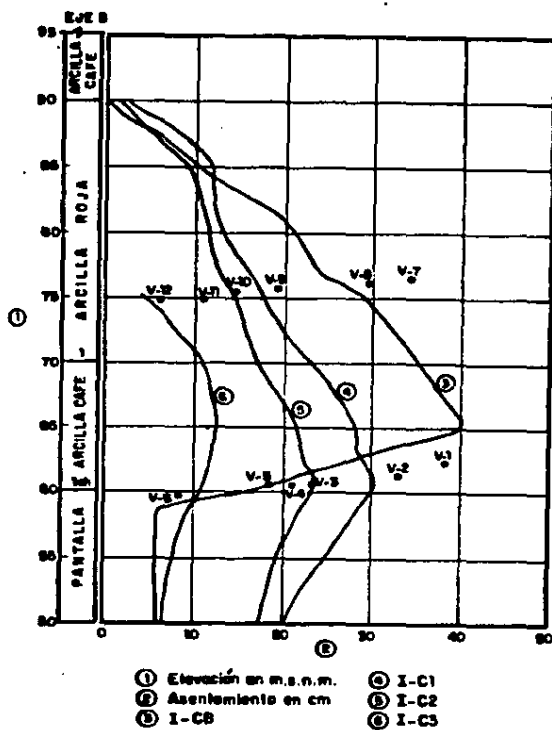
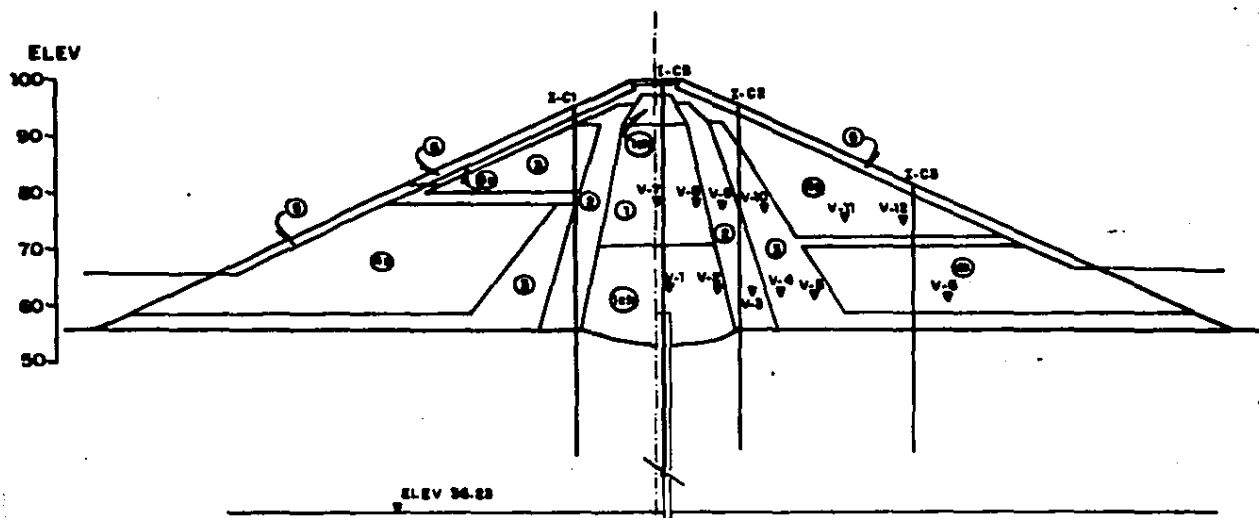


Fig 6.12 Asentamientos durante construcción, fecha ± 20 jul 86 - Sección C

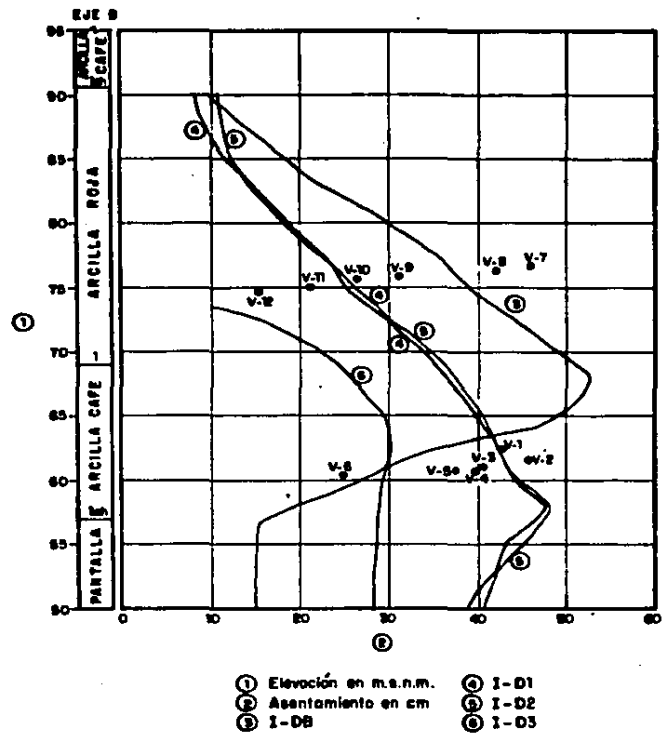
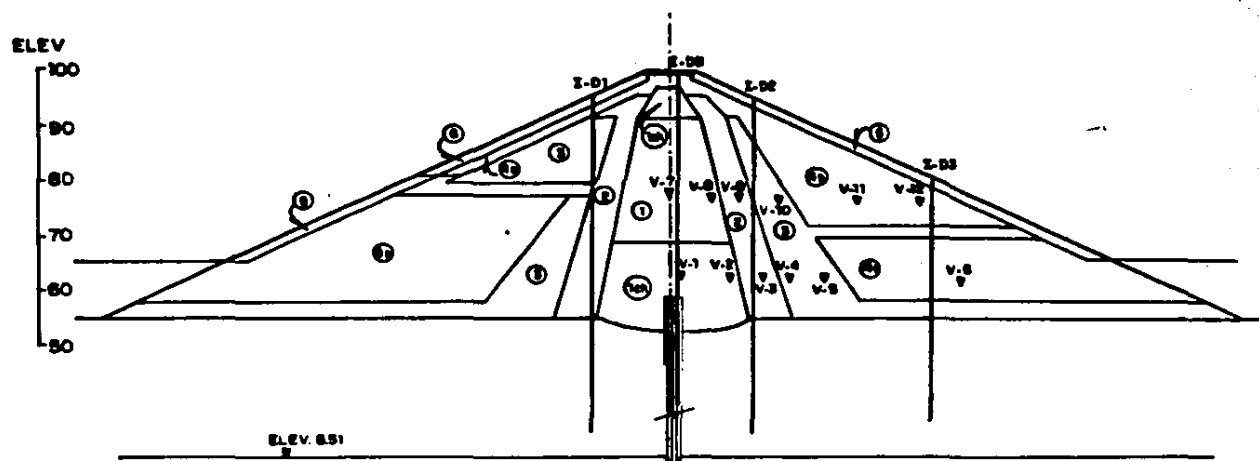


Fig 6.13 Asentamientos durante construcción, fecha 20 jul 86 - Sección D

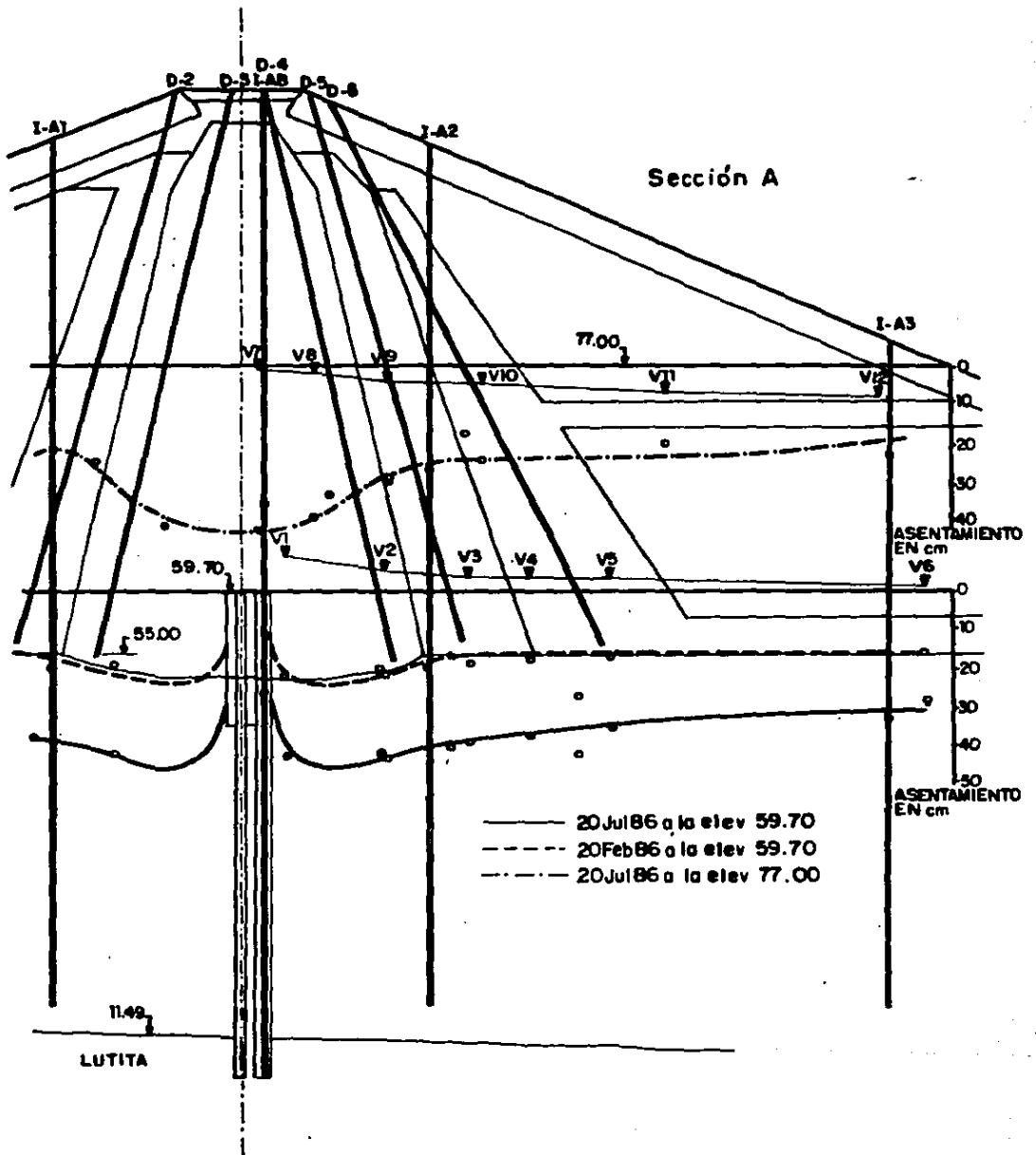


Fig 6.14: Asentamientos

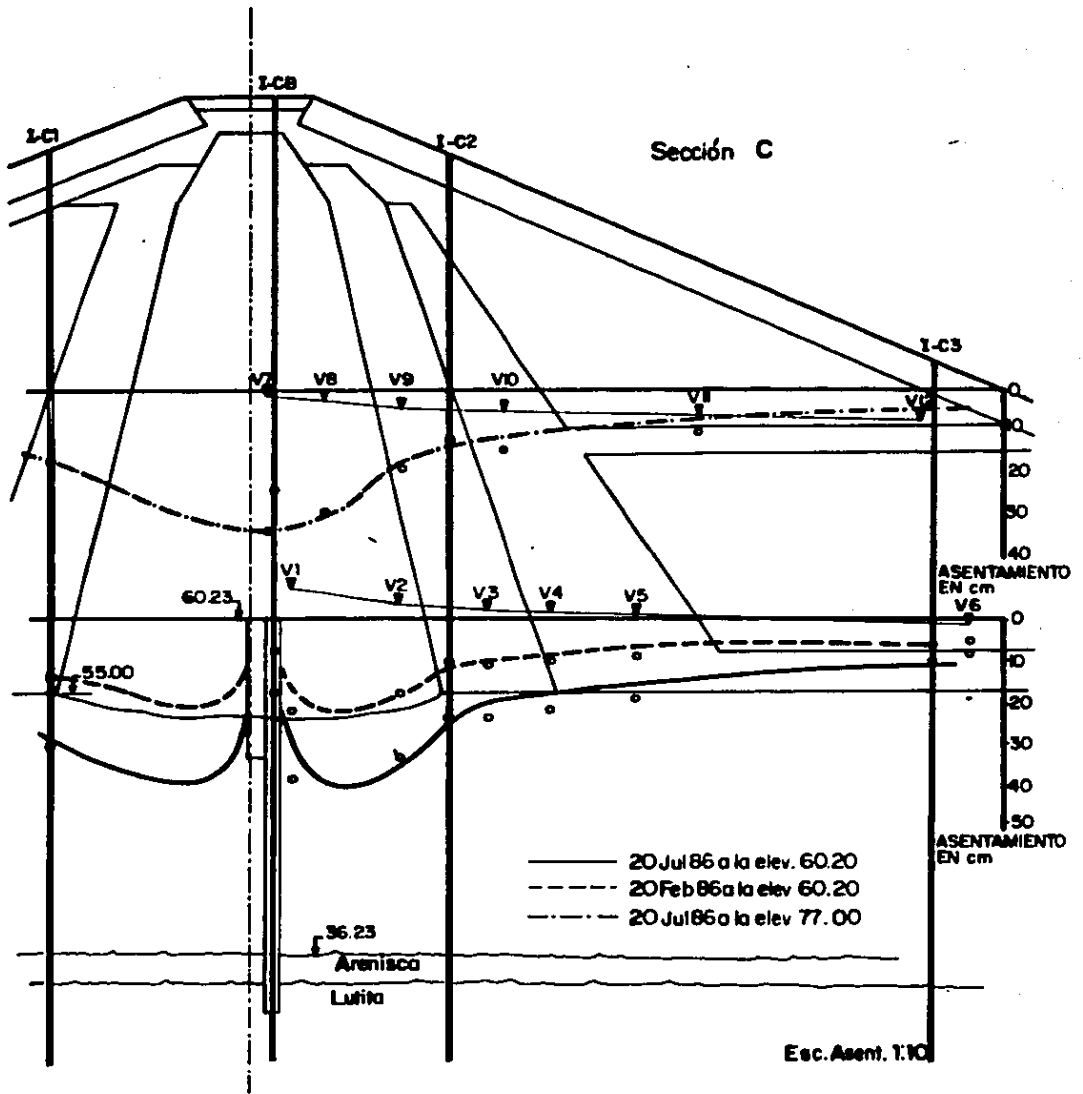


Fig 6.15 Asentamientos

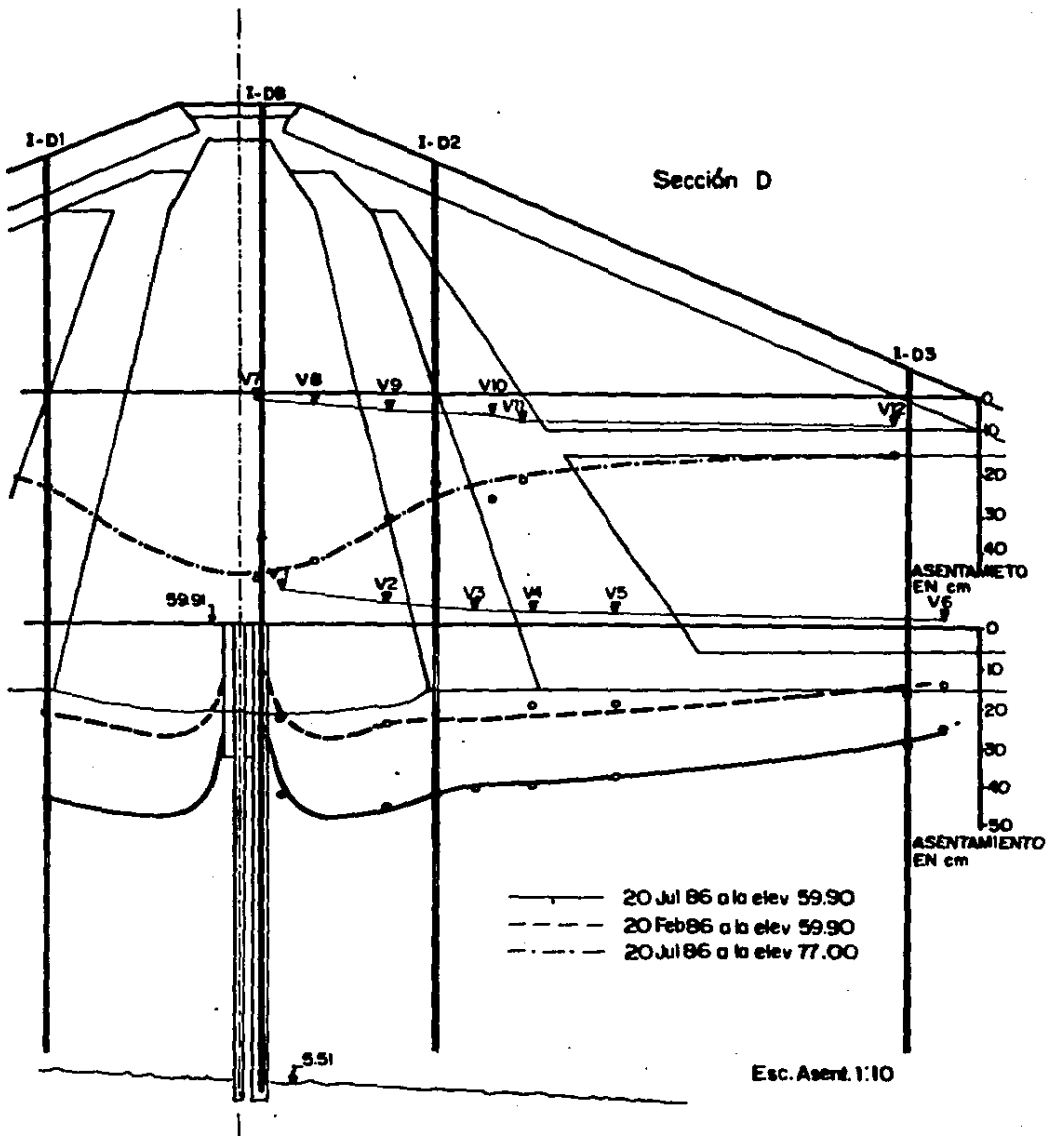


Fig 6.16 Asentamientos

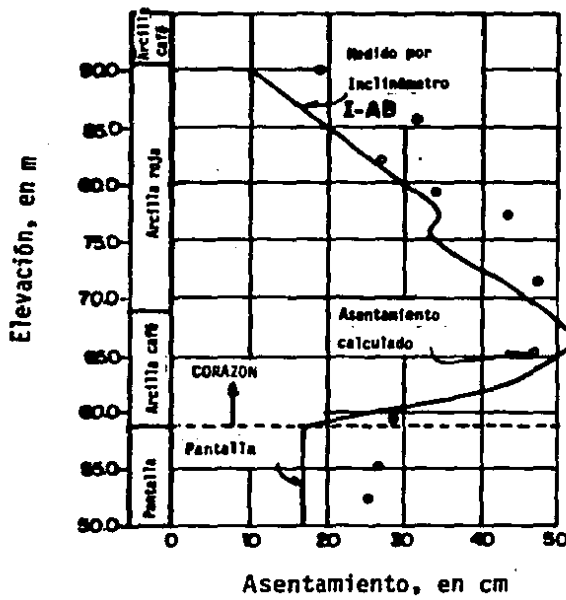
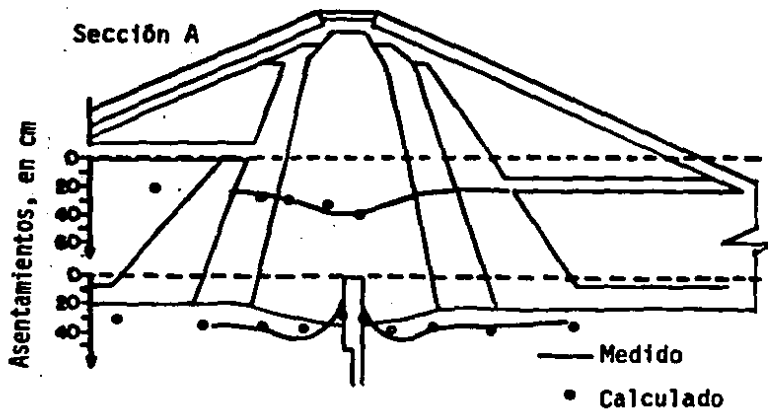
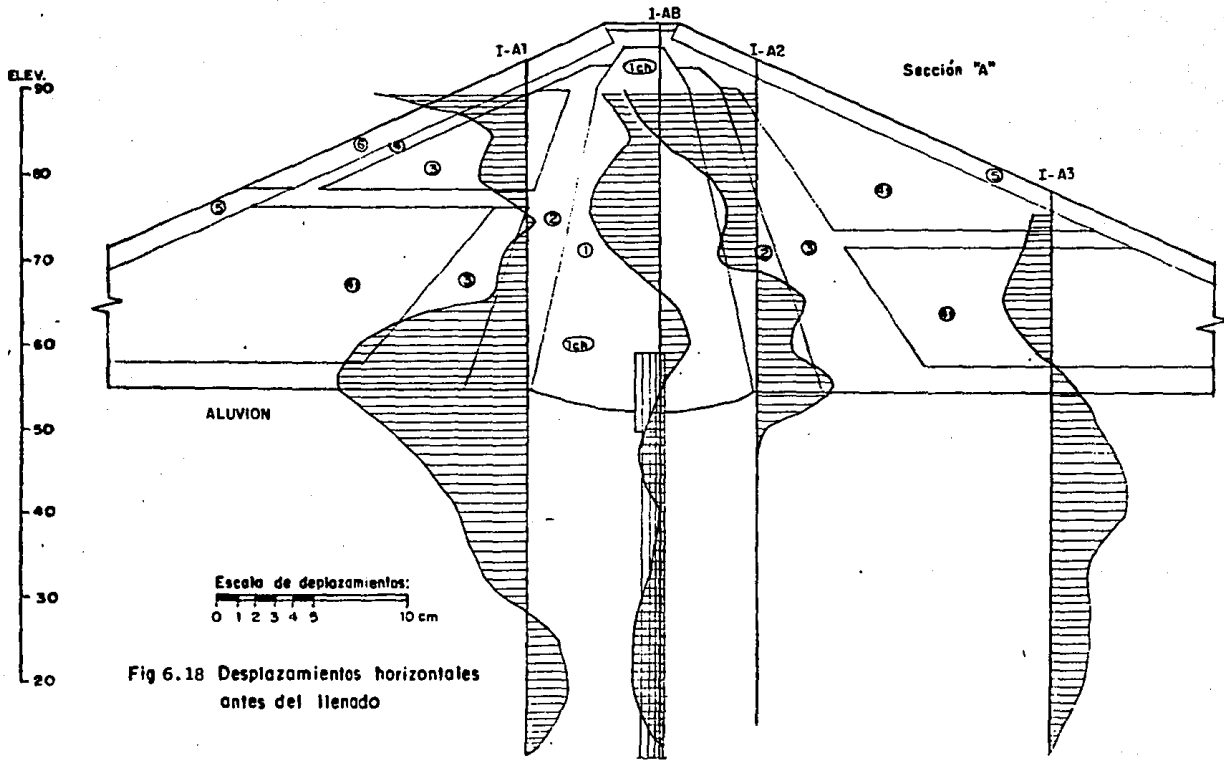


Fig 6.17 Asentamientos medidos vs. calculados (antes del llenado)



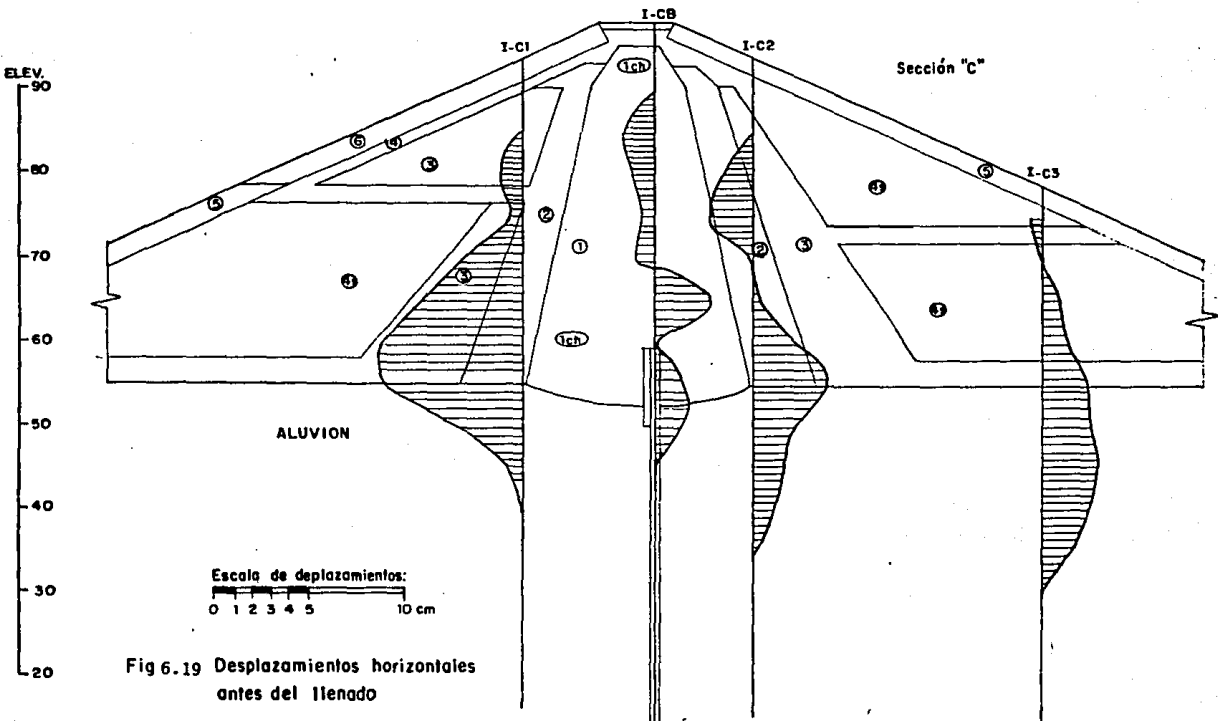


Fig 6.19 Desplazamientos horizontales antes del llenado

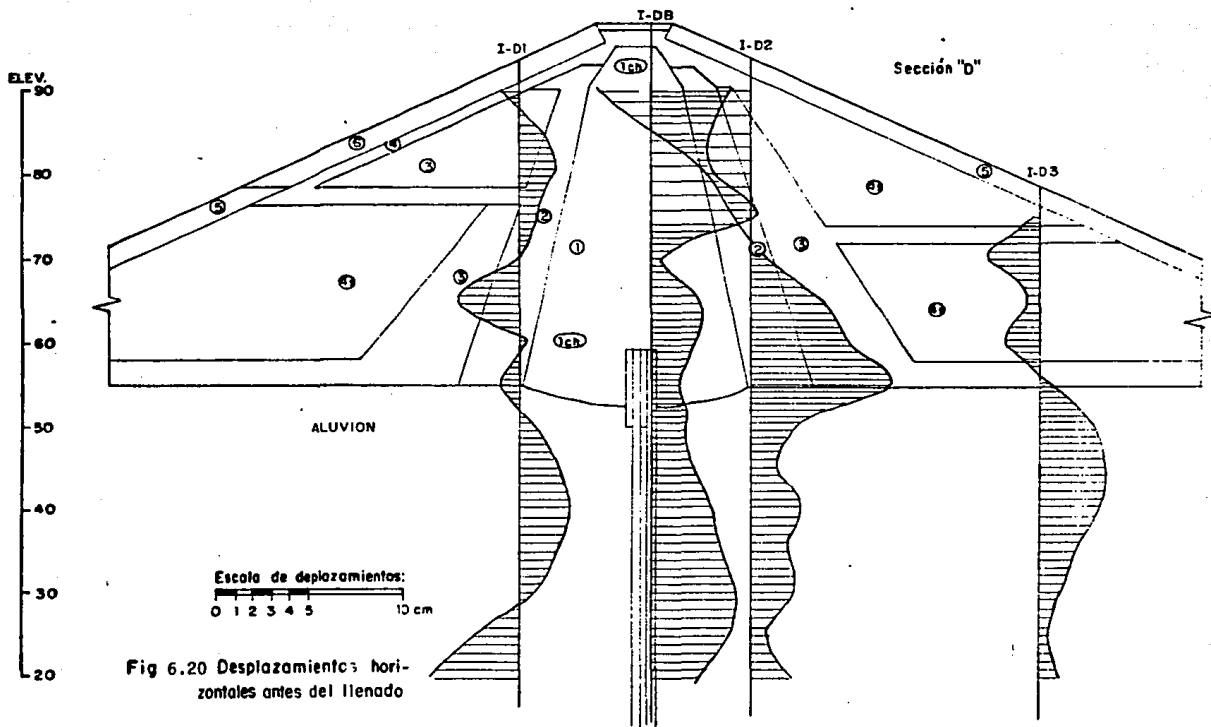


Fig 6.20 Desplazamientos horizontales antes del llenado

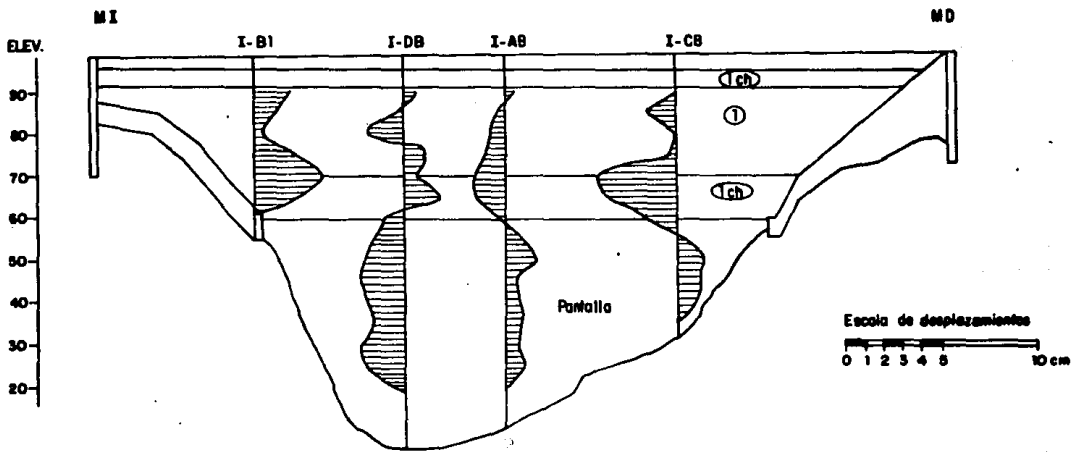
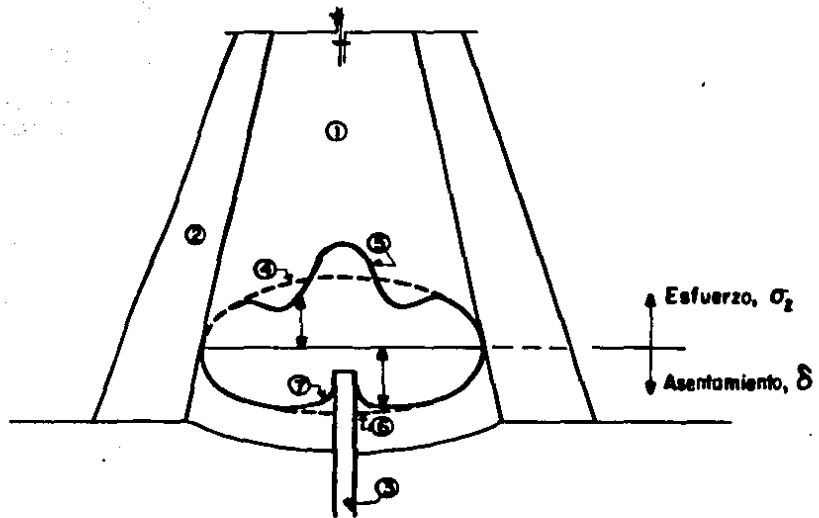


Fig 6.21 Desplazamientos horizontales antes del llenado.



- | | |
|---|---|
| ① Material blando | ⑤ Distribución de esfuerzos verticales con pantalla |
| ② Material rígido, silo | ⑥ Distribución de asentamientos sin pantalla |
| ③ Material rígido, pantalla | ⑦ Distribución de asentamientos con pantalla |
| ④ Distribución de esfuerzos verticales sin pantalla | |

Fig 6.22 Distribución de asentamientos y esfuerzos verticales en pantalla

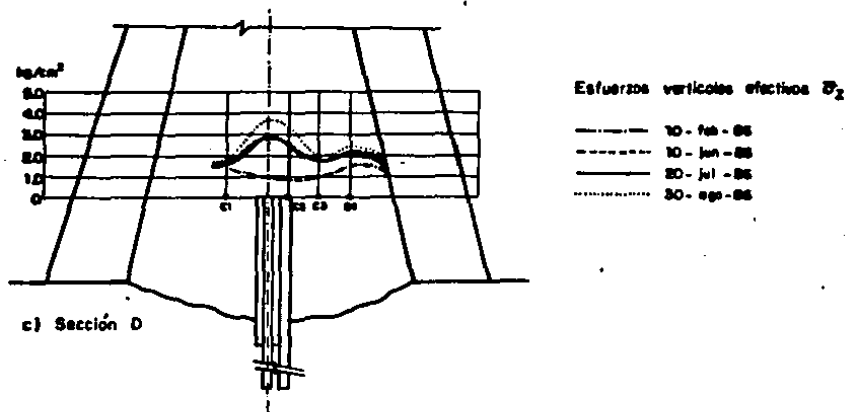
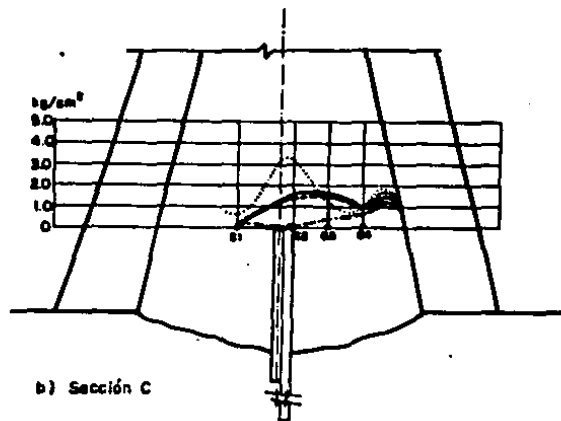
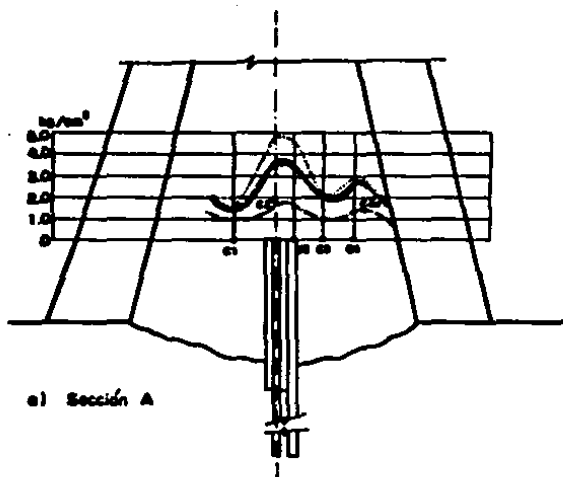


Fig. 6.23. Distribución de esfuerzos verticales efectivos medidos en el corazón

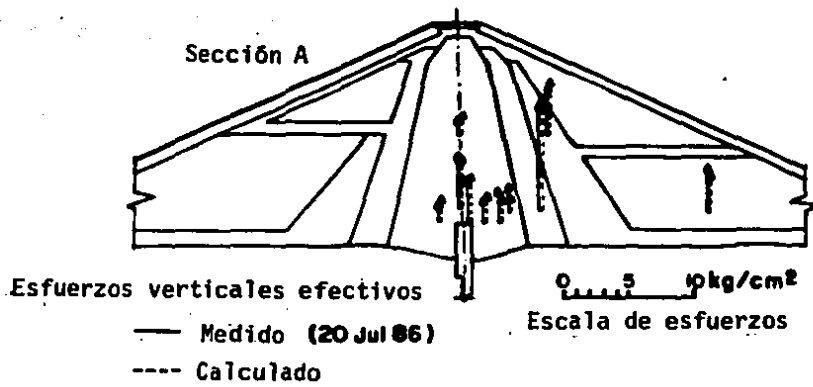


Fig 6.24 Esfuerzos verticales medidos vs. calculados

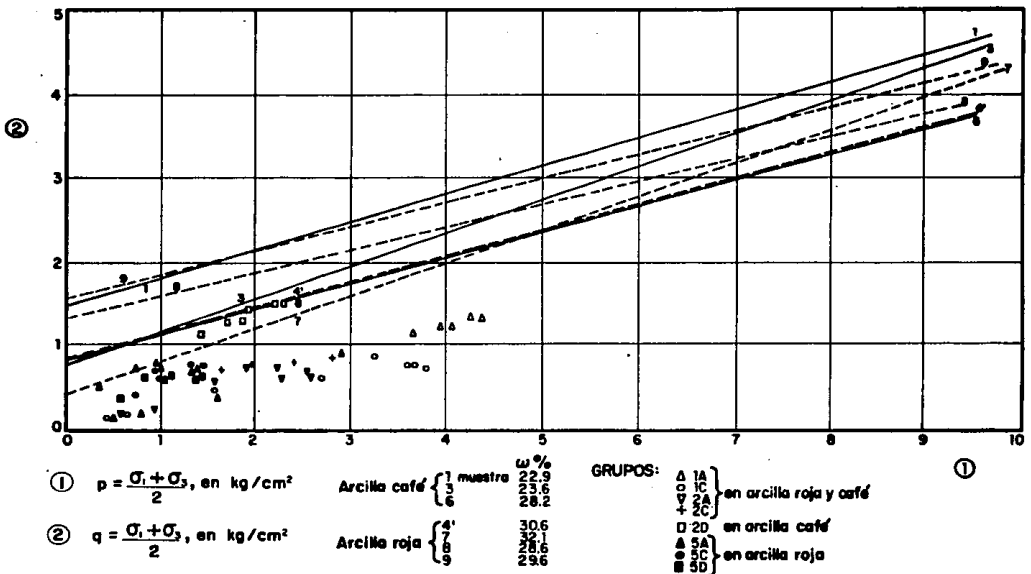


Fig 6.25 Trayectorias de esfuerzos totales de ensayos triaxiales CU y de campo

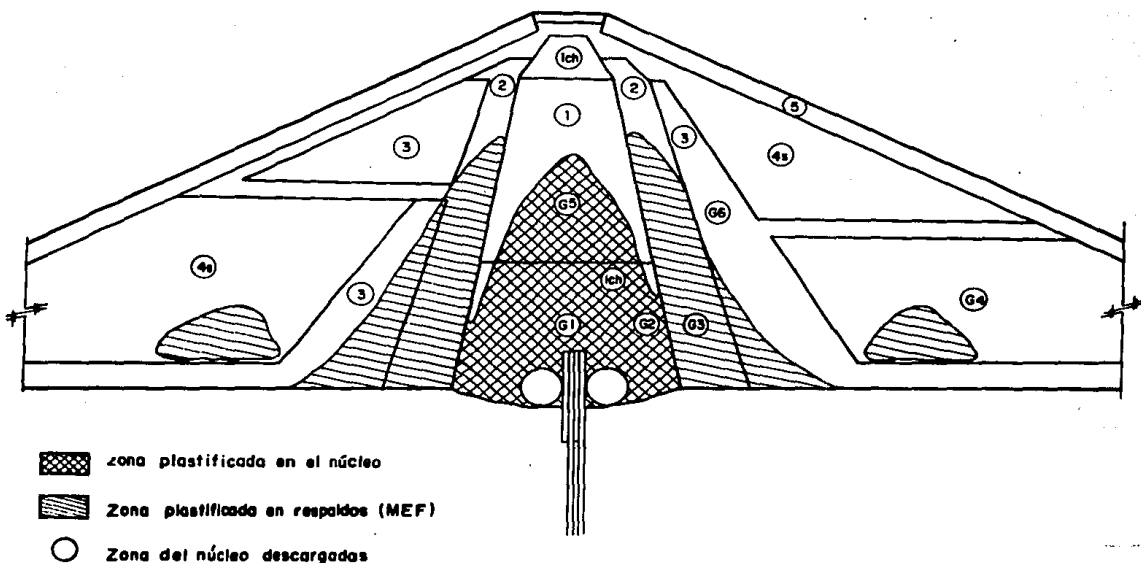


Fig. 6.26. Zonas plastificadas determinadas a partir de la instrumentación y de las trayectorias en términos de p-q.

