

01163  
2e)  
4



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENMA

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
SECCION DE MECANICA DE SUELOS

ASPECTOS SOBRE EL DISEÑO, COMPORTAMIENTO DURANTE  
LAS PRIMERAS ETAPAS DE CONSTRUCCION Y ANALISIS  
NUMERICOS DE LA PRESA CHICOASEN

T E S I S  
que presenta

CARLOS AUGUSTO RAMIREZ OREJUELA

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA  
(Mecánica de Suelos)

EL JEFE DE LA SECCION,

M EN I J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

EL SECRETARIO DE ASUNTOS ACADEMICOS

DR UBALDO BONILLA DOMINGUEZ

JURADO:

PRESIDENTE:   
VOCAL:   
SECRETARIO:   
SUPLENTE:   
SUPLENTE:

Cd Universitaria, México, D.F., agosto, 1980

JADR/roo

301044

XI 16/R 35 a 1980

TEJIS C N  
FALLA LE CRGEN



## **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.

# I N D I C E

	PAG.
1. INTRODUCCION	1
2. BREVE DESCRIPCION DE LA PRESA Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION	6
2.1 Descripción de la presa	6
2.2 Descripción de los materiales	6
3. EVOLUCION DEL DISEÑO DE LA PRESA	9
3.1 Generalidades	9
3.2 Evaluación de los análisis numéricos	10
3.3 Modificaciones en el diseño de la presa	15
4. INSTRUMENTACION Y RESULTADOS	51
4.1 Evaluación de las mediciones de campo	52
4.2 Comportamiento general de la presa	58
4.3 Análisis de problemas especiales de la presa	61
5. COMPARACIONES DE RESULTADOS DE ANALISIS NUMERICOS E INSTRUMENTACION	115
5.1 Evaluación de las hipótesis de análisis	116
5.2 Comparación de resultados	118
6. CONCLUSIONES	145
6.1 Instrumentación	146
6.2 Análisis Numéricos	149
A.1 PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACION DE LOS PARAMETROS DE LOS MATERIALES	152

A.2 BREVE DISCUSION ACERCA DE LAS DIRECCIONES DE MEDICION DE ESFUERZOS PARA LA OBTENCION DE ESTADOS DE ESFUERZOS

PAG.

155

REFERENCIAS

150

1.

INTRODUCCION

La presa Chicoasén forma parte del Proyecto Hidroeléctrico del mismo nombre, que actualmente construye la Comisión Federal de Electricidad en el estado de Chiapas.

Las secciones principales de la presa, que tiene una altura máxima de 264 metros, se muestran en las figuras 1.1 y 2.

El sitio de presa se halla localizado en un cañón formado por la erosión de calizas y presenta características topográficas complejas: Una garganta estrecha en el fondo del cañón, paredes muy pendientes en las elevaciones superiores y un cambio abrupto de la pendiente en la parte superior de la margen izquierda.

De las características muy especiales de la presa y su cimentación, antes numeradas, se han identificado tres problemas principales desde el punto de vista de diseño:

1) Interacción

presa - laderas, que puede provocar el desarrollo de zonas de bajos esfuerzos en la parte inferior del núcleo, con el consecuente peligro de la ocurrencia de fracturamiento hidráulico;

2) Interacción

núcleo - filtros, que debido a la mayor compresibilidad del primero podría provocar una reducción adicional de esfuerzos;

3) El cambio a-

brupto de pendiente en la parte superior de la margen izquierda que podría provocar la ocurrencia de grietas transversales.

Con el objeto de ponderar el efecto de las diferentes soluciones tendientes a aliviar los anteriores problemas, se han empleado en forma sucesiva análisis de elementos finitos, antes y durante la construcción de la presa.

Antes de la construcción de la presa se llevaron a cabo análisis bi y tridimensionales, alimentados con parámetros de los materiales obtenidos en base a la experiencia tenida en presas anteriormente analizadas y con base en algunas pruebas de laboratorio. Los resultados de estos análisis normaron la geometría del núcleo y la creación de zonas de materiales especiales con el objeto de aumentar el estado de esfuerzos en el núcleo a fin de minimizar el peligro de fracturamiento hidráulico.

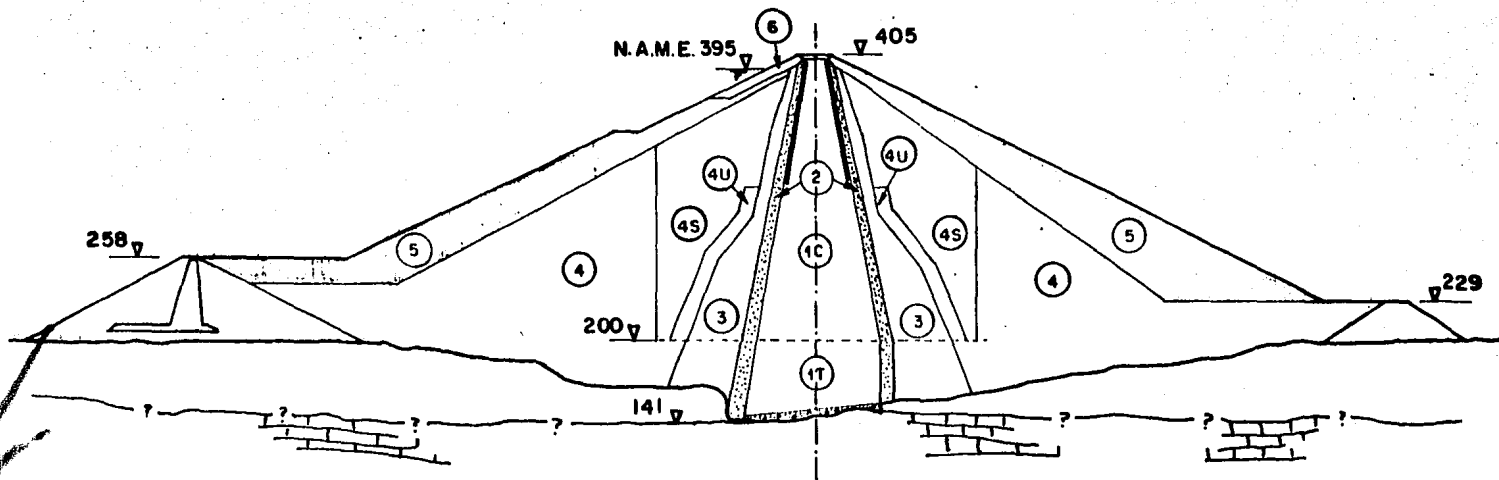
Durante la construcción de la presa se han venido efectuando análisis bidimensionales, alimentados con parámetros un poco mas refinados obtenidos de los resultados de las mediciones de campo. El objetivo ha sido el de investigar una zonificación adecuada de la parte superior del núcleo que evite en lo posible el desarrollo de zonas de tensión en el contacto presa - laderas.

Desde las primeras etapas de diseño y durante la construcción de la presa se ha proyectado la instalación de instrumentos

para la medición de esfuerzos y deformaciones en diferentes puntos de interés dentro de la estructura, con el objeto de observar el comportamiento de la presa durante y después de la construcción.

El objeto del presente trabajo es el de presentar en forma congruente:

- 1) La dinámica del diseño de la presa, respecto a los tres problemas identificados anteriormente, y producto de los análisis numéricos;
- 2) Algunos resultados importantes de la instrumentación durante construcción; y
- 3) Comparaciones cualitativas y cuantitativas entre los resultados numéricos bidimensionales mas refinados y las mediciones de campo.



**NUCLEO IMPERMEABLE**

(1T)

MATERIAL TEJERIA

(1C)

MATERIAL LA COSTILLA

(2)

FILTROS

(3)

TRANSICIONES

(4)

ENROCAMIENTO COMPACTADO

(4S)

ENROCAMIENTO SUELTO

(4U)

ENROCAMIENTO UNIFORME

(5)

ENROC. ACOMODADO CON TRACTOR

(6)

ENROC. DE GRAN TAMAÑO

**SECCION FINAL DE LA PRESA**

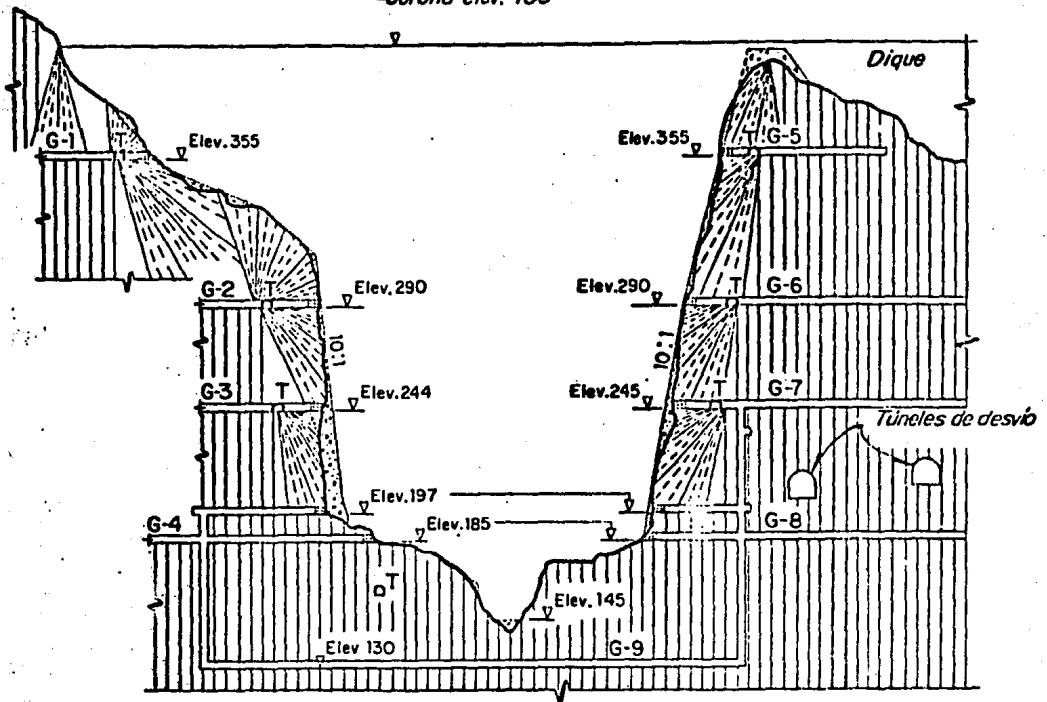
FIGURA 1.1



Margen izquierda

Margen derecha

Corona elev. 405



 Relleno de concreto

 Excavación

G-i Galerías principales de inyección y drenaje

T Galerías de inyección paralelas al río

 Barrenos de inyección

Elevaciones en metros

0 50 100  
metros

FIGURA 1.2 . REGULARIZACION DE LAS PAREDES DEL CAÑON; GALERIAS DE INYECCION Y DRENAJE A LO LARGO DEL EJE DE LA PRESA CHICOASEN

## 2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PRESA Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

### 2.1 Descripción de la presa

Parte principal del Proyecto Hidroeléctrico de Chicoasén es la presa del mismo nombre, del tipo tierra y enrocamiento actualmente en construcción. La estructura de 264 metros de altura máxima consta de un núcleo central impermeable de 95 metros de ancho en la base y 15 metros en la cresta; de filtros adyacentes al núcleo de 7.5 metros de espesor en promedio; zonas de transición amplias y de respaldos formados por masas de enrocamientos, figura 1.1 .

### 2.2 Descripción de los materiales

#### 2.2.1 Núcleo

El núcleo se ha construido con dos tipos de materiales, el denominado " Tejería " se empleó hasta la elevación 200 y el denominado " Costilla " en la altura restante. Ambos provienen de depósitos de suelos residuales que se clasifican como arenas arcillosas ( SC ) con alto contenido de gravas. El primero es producto interperizado del conglomerado continental que cubre la formación de lutitas del Eoceno y el segundo se originó por descomposición de la capa superior fracturada de estas lutitas.

La fracción gruesa es bien graduada, con partículas formadas por fragmentos de lutita ligeramente interperizada, en el ca

so del material " Costilla ", mientras que el suelo de " Tejería " está constituido por partículas redondeadas de composición mineralógica heterogénea ( de origen aluvial ). De acuerdo a los límites de Atterberg de la fracción fina ( pasa la malla 200 ), ambos suelos se clasifican como arcillas de baja plasticidad ( CL ) .

Amos materiales se colocan en capas de 25 cm de espesor y se compactan con seis pasadas de rodillos vibratorios con almohadillas de 7 ton; el contenido de humedad es el óptimo.

#### 2.2.2 Filtros

El material especificado para esta zona de la cortina corresponde a una arena bien graduada ( SW ) con tamaños de partículas hasta de 76 mm . El filtro de aguas arriba se construyó con arena proveniente de un suelo natural, mientras que el de aguas abajo se construyó con el producto de trituración, cribado y lavado de la roca caliza.

Estos materiales se colocan en capas de 40 cm de espesor mezcladas con motoconformadoras y compactadas con dos pasadas de rodillo liso de 10 ton .

#### 2.2.3 Transición

La mayor parte del material colocado en esta zona, es producto de la trituración y el cribado de calizas ( máximo tamaño 15 cm ). Su clasificación ha variado entre GW y GP. Se co

loca en capas de 40 cm de espesor y se compacta con dos pasadas de rodillo vibratorio de 10 ton .

#### 2.2.4 Enrocamiento

Los materiales para enrocamientos provienen de la explotación de calizas. El material con tamaño máximo entre 40 y 50 cm se destina a las zonas de enrocamiento compacto, mientras que el producto con fragmentos mayores se destina a las zonas a volteo adyacentes a los taludes exteriores del pedraplén. Las zonas compactadas se colocan en capas de 60 cm de espesor, compactándolas con cuatro pasadas de rodillo vibratorio de 12 ton .

En ( 9 ) se presenta un resumen detallado de las propiedades mecánicas de los materiales.

### 3. EVOLUCION DEL DISEÑO DE LA PRESA

#### 3.1 Generalidades

La actual disposición de las zonas internas de la presa Chiscoasén ha sido el producto de una dinámica de diseño continua, consistente en la identificación de problemas que afectan el adecuado comportamiento de la estructura, y la adopción de medidas para su solución o minimización. Dadas las condiciones especiales del cañón, que conllevaron a la identificación de los tres problemas ya enumerados en la introducción, la experiencia obtenida en estructuras de este tipo aplicada a la solución de estos problemas no era aplicable.

Por todo lo anterior se decidió llevar a cabo la ejecución de análisis numéricos, del tipo elementos finitos, con el objeto de evaluar, dentro de las limitaciones que este tipo de análisis implica, la magnitud de los problemas ya identificados y la bondad de las soluciones sugeridas para remediarlos. Los análisis se han efectuado en tres grupos, desde el inicio de la construcción de la presa. Los parámetros de los materiales se han determinado, en consecuencia, en forma empírica, en los primeros análisis, y empleando métodos más racionales cuando se tuvo información disponible de la instrumentación.

Para la elaboración de este trabajo se dispone de tres análisis bidimensionales, adicionales a los anteriores, ejecutados en las dos secciones principales de la presa tomando en cuenta

ta la zonificación actual de los materiales y utilizando parámetros más refinados.

En base a estos resultados se hará inicialmente una evaluación de la sensibilidad de los análisis numéricos bidimensionales a variaciones en los parámetros de los materiales. Posteriormente se presentarán los resultados de los análisis en base a cuyos resultados se ha modificado el diseño de la presa.

### 3.2 Evaluación de los Análisis Numéricos

#### 3.2.1 Consideraciones generales

El método del elemento finito es una herramienta matemática, que permite conocer los estados de esfuerzos y deformaciones en un medio continuo cualquiera.

Para su ejecución es necesario establecer:

- a) Las propiedades esfuerzo - deformación de los materiales, y
- b) Las condiciones de frontera del problema.

Cuando se trata de análisis bidimensionales, es necesario además establecer si el problema es uno de

- a) Deformación plana,
- o
- b) Esfuerzo plano .

### 3.2.1.1 Propiedades de los materiales

El problema más importante por resolver en estos análisis es el de la asignación de los parámetros de los materiales.

En la mayoría de los análisis llevados a cabo para la presa Chicomás, los incrementos de esfuerzos se relacionan con el incremento de deformaciones unitarias mediante la ley generalizada de Hooke para materiales isotrópicos. Es necesario determinar dos parámetros independientes, el módulo de deformación,  $E$ , y la relación de Poisson,  $\nu$ .

Se han utilizado las expresiones desarrolladas en (5), que son las siguientes:

$$\epsilon_t = K (\sigma_3)^n \left[ 1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \quad (1)$$

$$\nu_t = \frac{G - F / \sigma_3 (\sigma_3)}{1 - \frac{d (\sigma_1 - \sigma_3)}{E_s}} \quad (2)$$

con

$$E_s = K (\sigma_3)^n \left[ 1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]$$

El significado físico de (1) y (2) es el siguiente:

- El módulo de deformación,  $E_t$ , es la pendiente de una curva esfuerzo - deformación en una prueba triaxial típica, para un esfuerzo de confinamiento dado,  $\sigma_3$ .
- La relación de Poisson,  $\nu_t$ , es la pendiente de la relación deformación unitaria axial,  $\epsilon_a$ , - deformación unitaria radial,  $\epsilon_r$ , en una prueba triaxial típica, para un esfuer-

zo de confinamiento dado,  $\sigma_j$ .

Es hipótesis básica, para la obtención de las expresiones anteriores, que las relaciones correspondientes están representadas por hipérbolas.

Al adoptar estas relaciones en los análisis se está suponiendo que las condiciones de esfuerzos y deformaciones en la presa quedan representadas por pruebas triaxiales típicas.

Estas relaciones representan tan solo una aproximación cruda al comportamiento real de los materiales.

#### 3.2.1.2 Condiciones de frontera

En una presa de tierra están dadas por los contactos cortina - roca, y por la geometría exterior de la estructura.

Los desplazamientos en los contactos con la roca se restringen a valores nulos.

Los primeros análisis de Chicoasén no contemplaron la garganta inferior del cañón, descubierta luego de la limpia de los materiales aluviales del lecho del río.

#### 3.2.1.3 Estado de esfuerzo y deformación plana

Los análisis bidimensionales que se utilizarán para las confrontaciones con los resultados de la instrumentación, consi



deran un estado de deformación plana en las dos secciones de análisis. La validez de esta hipótesis se discutirá en el capítulo 5 .

En general, para aquellos casos en que la sección estudiada no se comporte estrictamente bajo los estados de deformación o esfuerzos supuestos, los resultados involucran una imprecisión adicional por este concepto.

Es importante hacer notar que los análisis bidimensionales, no toman en cuenta fenómenos de interacción que ocurran en la dirección perpendicular a la sección estudiada.

### 3.2.2 Sensibilidad de los Análisis Numéricos

En las tablas 3.1 a 5 se muestran los parámetros utilizados en los dos grupos de análisis mas recientes, 4 y 5. El primero corresponde a estudios efectuados en la sección transversal máxima y el segundo en la sección longitudinal máxima. La metodología para la obtención de los parámetros de los Grupos 4A y 5A se describe en ( 14 ), y no se presenta ninguna discusión al respecto en el presente trabajo. La obtención de los parámetros de los grupos restantes ha seguido una misma lógica, basándose en los resultados de la instrumentación de la presa. La descripción del método utilizado se presentará en el Anexo 1.

Como se puede apreciar en las tablas mencionadas, los valores

utilizados del parámetro K, presenta variaciones relativas de hasta diez veces su magnitud. Los parámetros de resistencia se han escogido con criterios diferentes para los análisis 4A y 5A, respecto a los restantes.

Para efectos comparativos, se presentan inicialmente en las tablas 3.6 y 7, los resultados de esfuerzos y deformaciones en las direcciones vertical ( Z ) y horizontal ( X e Y ) en puntos localizados en el eje central del núcleo en ambas secciones. Estos puntos coinciden con estaciones de medición en el prototipo.

Las diferencias máximas relativas en esfuerzos, en las dos secciones, son del orden de 20%, mientras que en deformaciones llegan a ser mayores de 100%. Las deformaciones menores se presentan en los casos en que los parámetros K son mas altos.

Para ilustrar la importancia relativa entre las rigideces de las diferentes zonas de materiales de la presa, se presentan en la tabla 3.8 los estados de esfuerzos obtenidos en la sección longitudinal máxima, en las elevaciones 245 y 302. Tal como se estableció anteriormente, en la parte central del núcleo los estados de esfuerzos obtenidos en los dos análisis presentan discrepancias menores. Sin embargo, las magnitudes relativas de los esfuerzos que se generan en los filtros, transición y eurocamientos respecto a los del núcleo varían apreciablemente de un análisis a otro.

Lo anterior pone en evidencia que existe poca sensibilidad de

Los valores de esfuerzos calculados en zonas alejadas de los contactos entre materiales de diferentes propiedades. Tanto los esfuerzos en zonas cercanas a contactos como en general las deformaciones son altamente dependientes de los valores de los parámetros de los materiales. Aunque son solo dos los resultados que se poseen en la sección longitudinal máxima, la evidencia de los resultados parece mostrar que la reproducción de fenómenos de interacción, depende tanto del valor relativo de las rigideces de los materiales como de los valores absolutos. Lo anterior se afirma teniendo en mente que existe una mayor transferencia de esfuerzos al filtro de aguas abajo en el análisis 5A que en el 5B, teniendo aquellos valores absolutos y relativos de los parámetros K del núcleo y filtro menores que este.

### 3.3 Modificaciones en el diseño de la presa

El diseño de la presa Chicoasén contemplaba la construcción de un núcleo inclinado, y zonas de filtros, transición y enrocamientos, con la distribución mostrada en la figura 3.1.

Con base en el estudio de los resultados de tres grupos de análisis numéricos se han adoptado sendas modificaciones en el diseño de la presa. Estas modificaciones han consistido en:

- 1) La adopción de un núcleo vertical central, figura 3.2;
- 2) La colocación de zonas de enrocamiento uniforme adyacentes a las zonas de transición, y la colocación de una zona de arcilla húmeda en el contacto del corazón y las laderas, figura 3.3 ;

- 3) La prolongación de la zona húmeda del corazón, tal como se muestra en la figura 3.19, caso 6 .

Los análisis que se presentan a continuación, fueron ejecutados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Comisión Federal de Electricidad durante el período 1976 - 1979. Para el estudio congruente de sus objetivos conviene reunirlos en tres grupos.

### 3.3.1 Descripción de los Grupos de Análisis Numéricos

#### 3.3.1.1 Grupo 1 ( 1976 ) Ref. ( 6 )

##### a) Características.-

Análisis bidimensionales de tipo incremental en las secciones máximas de la presa, simulando la construcción de la estructura por la colocación de 12 capas. La geometría idealizada del cañón no contempló la garganta inferior.

##### b) Idealización de los materiales .-

El comportamiento de los materiales se idealizó como elástico no lineal, utilizando las expresiones de la sección 3.2.1 .

Debido a que este grupo de análisis se llevó a cabo antes de la construcción de la presa, los parámetros se dedujeron de unas pocas pruebas de laboratorio y de la experiencia tenida en análisis similares en otras presas como la Angostura.

En la tabla 3.9 se muestran los parámetros utilizados en es-

te grupo, que corresponden a los casos 4, 5 y 7 de ( 6 ) .

c) Suposiciones de Análisis .-

Para la sección longitudinal máxima se supuso un estado de deformación plana y para la transversal un estado de esfuerzo plano.

d) Objetivos .-

Analizar el estado de esfuerzos y deformaciones en las secciones máximas para varias alternativas, que consideraban diferentes geometrías de las zonas internas de la presa, específicamente del núcleo, figuras 3.1 y 2 .

3.3.1.2 Grupo 2 ( 1976/77 ) Ref. ( 8 )

a) Características .-

Análisis tridimensionales de tipo incremental, simulando las etapas de construcción de la presa mediante la colocación de cinco capas. No se consideró en los análisis la verdadera geometría de la parte baja del cañón.

b) Idealización de los materiales .-

Se supusieron los materiales como elásticos. Aunque tal suposición es completamente irreal, sirvió para sopesar la influencia en el estado de esfuerzos al final de la construcción de cada una de las alternativas estudiadas.

c) Objetivos.-

Analizar el estado de esfuerzos al final de la construcción de la presa para investigar la posibilidad de la ocurrencia de fracturamiento hidráulico en las zonas inferiores del núcleo. Para lo anterior se efectuaron los siguientes análisis:

- . Construcción de la presa con una distribución de las zonas internas idénticas a las propuestas en las conclusiones de los análisis del grupo 1;

- . Construcción de la presa con la zonificación mostrada en las figuras 3.4 y 5.

- . Llenado del embalse para el mismo caso anterior.

Algunos otros análisis, que dentro de los objetivos del presente trabajo se consideran secundarios se presentan en ( 7 ) y ( 8 ) .

### 3.3.1.3 Grupo 3 ( 1978 / 79 ) Refs. ( 9 ) y ( 10 )

#### a) Características.-

Análisis bidimensionales de tipo incremental en la sección transversal máxima de la presa, considerando la geometría real del cañón, simulando la construcción de la presa con 11 capas.

#### b) Idealización de los materiales.-

Se consideró un comportamiento elástico no lineal de los materiales, utilizando las expresiones de la sección 3.2.1. Los parámetros de los materiales se dedujeron de las primeras mediciones de campo efectuadas.

das en la presa. En el Anexo 1 se presenta el procedimiento seguido para la obtención de estos parámetros.

### c) Objetivos .-

Analizar el estado de esfuerzos y deformaciones en la sección transversal máxima, considerando varias alternativas de zonificación interna dentro del núcleo, con el objeto de minimizar zonas de tensión en la parte superior del estribo izquierdo, figura 3.19 .

## 3.3.2 Resultados

### 3.3.2.1 Grupo 1

Los resultados mas significativos para el caso en que se consideró la construcción de un núcleo inclinado se muestran en las figuras 3.6 y 7.

En la primera se muestran las zonas de la presa en que se ha excedido la resistencia de los materiales. Estas zonas pueden provocar, bajo la imposición de la carga del embalse desplazamientos apreciables, tal como ocurrió en la presa la Angostura, donde la geometría de las zonas plastificadas era muy similar a la mostrada en la figura 3.6. En la figura 3.7 se muestra la distribución de los vectores de desplazamientos resultantes al final de la construcción. La dirección de los vectores muestran una notable asimetría, que implica la generación de esfuerzos de flexión en el núcleo, no deseables.

En las figuras 3.8 y 9 se muestran los resultados obtenidos

para el caso de considerar la construcción de un núcleo central. Las zonas de plastificación se han reducido en el respaldo de aguas arriba, distribuyéndose en forma simétrica en el núcleo y zonas adyacentes. La distribución de los vectores de desplazamientos es simétrica para este caso.

Las condiciones mas favorables que se presentan para el caso de un núcleo central, provocaron la primera modificación del diseño de la presa.

### 3.3.2.2 Grupo 2

El primer análisis identificado como caso 2 en ( " ), consistió en evaluar el estado de esfuerzos en la presa considerando los parámetros de la tabla 3.10. El núcleo se consideró central simétrico tal como se adoptó luego de los análisis del grupo 1.

En las figuras 3.10 a 12 se muestran las distribuciones de esfuerzos en las direcciones paralela al eje de la presa ( Y ) y vertical ( Z ). Se observa que el valor de los esfuerzos verticales es del orden de  $24 \text{ Kg/cm}^2$  en la parte baja del núcleo y presenta valores aún menores de la parte central hacia las laderas en esa misma zona del núcleo, figura 3.11. Teniendo en cuenta que la carga aproximada que impondría el embalse sobre esta zona del núcleo era del orden de  $24 \text{ Kg/cm}^2$  se presentaba la posibilidad de la ocurrencia de un fracturamiento hidráulico del corazón.

La evidencia anterior llevó a la consideración de alternati-



vas para tratar de elevar el estado de esfuerzos en el interior del núcleo. En ( 7 ) se propuso como solución la distribución de las zonas internas mostradas en las figuras 3.4 y 5. Se buscaba aumentar la transferencia de carga de las zonas aledañas al núcleo, colocando materiales mas compresibles, y además tratar de destruir el posible efecto de arco entre las laderas colocando en el contacto presa - laderas materiales menos resistentes, en la realidad zonas más húmedas de arcilla. El análisis de esta alternativa se llevó a cabo con los parámetros correspondientes al caso 3, tabla 3.10 .

El efecto de la solución considerada puede apreciarse al comparar los resultados mostrados en las figuras 3.13 a 15 con las 3.10 a 12 . En general se obtiene un estado de esfuerzos mas alto. En la sección longitudinal máxima los esfuerzos verticales máximos son del orden de  $30 \text{ kg/cm}^2$  . En la sección transversal los esfuerzos verticales aumentan en la zona inferior del cañón y de estribo a estribo. Sin embargo, seguían existiendo zonas donde persistía la posibilidad del fracturamiento hidráulico. En la figura 3.14 se aprecia una zona de bajos esfuerzos en la parte media de la margen izquierda. Por lo que respecta a los esfuerzos horizontales paralelos al eje de la presa, en la figura 3.15 se observa una zona crítica entre las curvas correspondientes a 15 y  $20 \text{ kg/cm}^2$  .

Los resultados anteriores pusieron en evidencia que los cambios en la zonificación de la presa producían el efecto deseado: aumentar el estado de esfuerzos dentro del núcleo, minimizando por tanto el problema del fracturamiento hidráulico.

Sin embargo, considerando que la imposición de carga por el llenado del embalse produciría cambios en el estado de esfuerzos, el siguiente paso consistió en analizar el mismo caso simulando ahora el llenado del embalse. El empuje del agua se consideró concentrado en los puntos correspondientes al parámetro de aguas arriba del corazón y corresponden a una elevación del embalse de 385 m.s.n.m. . El efecto de surgencia del enrocamiento y transiciones se ha tomado como una fuerza de cuerpo dirigida hacia arriba. No se consideraron las deformaciones que pudiesen ocurrir en el enrocamiento por efecto de la saturación y su consiguiente rotura, ( 8 ) .

En las figuras 3.16 a 18 se muestran las curvas de iguales esfuerzos Z e Y en las secciones máximas. En este grupo de gráficas puede observarse que los cambios en los esfuerzos por la imposición inmediata de la carga del embalse, son tales, que las zonas críticas de bajos esfuerzos permanecen prácticamente inalteradas.

Se concluyó que la zonificación considerada en las figuras 3.4 y 5 era recomendable para tratar de minimizar el peligro potencial del fracturamiento hidráulico. En consecuencia se adoptó la distribución de materiales mostrada en la figura 3.3 .

Las elucubraciones cuantitativas respecto a la ocurrencia del fenómeno no eran concluyentes debido a las limitaciones implícitas dentro del análisis, principalmente respecto a la

geometría del cañón y a la idealización del comportamiento de los materiales.

### 3.3.2.3 Grupo 3

En la figura 3.19 se muestran las seis alternativas consideradas en este grupo. Desde las primeras etapas de diseño se había identificado el cambio brusco de pendiente en el estribo izquierdo, como posible causa de deformaciones diferenciales que podrían ocasionar zonas de tensión.

La solución intuitiva a este problema consistía en prolongar la zona de material arcilloso mas húmedo, colocado en el contacto núcleo - laderas, hasta la cresta de la presa. Los análisis se efectuaron con los parámetros mostrados en la Tabla 3.12. A medida que se fueron obteniendo resultados de los diferentes casos considerados, se jugó con varias alternativas, siguiendo la misma filosofía, hasta minimizar el problema.

En las figuras 3.20 y 21 se muestran las zonas de tensión y plastificadas de los casos 1 y 6. El caso 1, que representaba la zonificación mostrada en la figura 3.19, muestra la presencia de zonas de tensión cerca del cambio abrupto de pendiente en la ladera izquierda, lo que se interpretó en el caso real como la presencia de bajos esfuerzos, no deseables en esa localización de la presa.

Los siguientes casos representaron una variedad de soluciones propuestas, que tuvieron poco efecto en hacer desaparecer

tales zonas, a excepción del Caso 6, donde desaparecen.

La decisión final fué la de colocar una zona húmeda con la geometría mostrada en el Caso 6, figura 3.19 .

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	C Kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
Tejería	412	0.4	0.35	3.50	9°
Costilla	460	0.4	0.35	1.90	30°
Zona Húmeda	60	0.4	0.38	1.90	30°

TABLA 3.1 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS 4A

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	C Kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
Tejería	750	0.4	0.33	1.4(1)	0°
				0.0(2)	30°
Costilla	1500	0.4	0.30	1.0(3)	0°
				0.0(4)	40°
ZONA HÚMEDA	190	0.4	0.40	1.0	0°

(1) para valores de 3.5 (2) para valores de 3.5

(3) para valores de 3.0 (4) para valores de 3.0

TABLA 3.2 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS 4B

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	c Kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
Tejería	3900 (1)	0.4	0.2	1.4 (1)	0°
	1050 (2)			0 (2)	34°
Costilla	550 (3)	0.4	0.3	1.0 (3)	0°
	3950 (4)			0.0 (4)	36°
Zona Húmeda	150	0.4	0.4	1.0	0°

- (1) para valores de 5.0 Kg/cm<sup>2</sup>      (2) para valores de 5.0 Kg/cm<sup>2</sup>  
(3) para valores de 3.0 Kg/cm<sup>2</sup>      (3) para valores de 3.0 Kg/cm<sup>2</sup>

TABLA 3.3 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS 4 C

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	c Kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
Filtro	412	0.7	0.35	0	43°
Transición	474	0.7	0.35	0	43°
Enrocamiento Uniforme	1000	0.2	0.35	0	39°
Enrocamiento Compacto	1248	0.2	0.30	0	39°
Enrocamiento Suelto	1250	0.2	0.30	0	39°
Aluvión	900	0.3	0.40	0	35°

Nota : Los parámetros correspondientes al núcleo son los mismos utilizados en el Grupo 4A

TABLA 3.4 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE A - ANALISIS 5A

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	c Kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
Filtro	2200	0.4	0.35	0	30°
Transición	1700	0.4	0.35	0	30°
Enrocamiento Uniforme	1500	0.4	0.30	0	35°
Enrocamiento Compacto	1500	0.4	0.30	0	.
Enrocamiento Suelto	1000	0.4	0.30	0	35°
Aluvión	1000	0.4	0.30	0	35°

Nota : Los parámetros correspondientes al núcleo son los mismos utilizados en el Grupo de análisis 4B

TAHLA 3.5 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS 5B

ELEVACION	GRUPO DE ANALISIS 4A				GRUPO DE ANALISIS 4B				GRUPO DE ANALISIS 4C			
	ESFUERZOS		DEFORMACIONES		ESFUERZOS		DEFORMACIONES		ESFUERZOS		DEFORMACIONES	
	Kg/cm <sup>2</sup>		%		Kg/cm <sup>2</sup>		%		Kg/cm <sup>2</sup>		%	
	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\epsilon_z$	$\epsilon_x$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\epsilon_z$	$\epsilon_x$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\epsilon_z$	$\epsilon_x$
150	- 13.6	- 8.2			- 11.3	- 7.6			- 12.2	- 6.7		
190	- 20.3	- 11.6	- 3.1	- 0.1	- 22.0	- 12.6	- 1.9	- 0.2	- 23.2	- 11.4	- 0.9	- 0.2
245	- 21.9	- 8.7	- 4.3	+ 0.8	- 23.2	- 11.1	- 1.9	- 0.1	- 24.5	- 11.3	- 2.1	0.0
302	- 13.2	- 6.3	- 2.2	- 0.2	- 13.5	- 7.0	- 3.0	- 0.1	- 11.6	- 5.4	- 3.0	0.0

TABLA 3.6 . RESULTADOS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES A LO LARGO DEL EJE CENTRAL DEL NUCLEO - SECCION TRANSVERSAL MAXIMA, ELEVACION DEL TERRAPLEN 365 n.s.n.r.



ELEVACION	GRUPO DE ANALISIS 5A				GRUPO DE ANALISIS 5B			
	ESFUERZOS		DEFORMACIONES		ESFUERZOS		DEFORMACIONES	
	Kg/cm <sup>2</sup>		%		Kg/cm <sup>2</sup>		%	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$
150	- 28.4	- 15.5	- 3.1	- 0.2	- 35.2	- 17.6	- 2.4	0.0
180	- 23.6	- 13.6	- 4.6	- 0.2	- 27.9	- 15.0	- 2.1	- 0.1
245	- 20.4	- 11.1	- 2.3	0.0	- 23.4	- 10.8	- 0.9	- 0.1
302	- 11.3	- 5.5	- 1.4	0.0	- 12.3	- 5.2	- 0.9	0.0

TABLA 3.7 . RESULTADOS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES A LO LARGO DEL EJE CENTRAL DEL NUCLEO. SECCION LONGITUDINAL MAXIMA. ELEVACION TERRAPLEN 390

LOCALIZACION	ELEVACION	GRUPO DE ANALISIS 5A		GRUPO DE ANALISIS 5B	
		ESFUERZOS		ESFUERZOS	
		Kg/cm <sup>2</sup>		Kg/cm <sup>2</sup>	
		$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
NUCLEO - CENTRO	245	- 20.6	- 10.8	- 23.6	- 10.5
FILTRO - A. ABAJO	245	- 32.8	- 9.3	- 23.8	- 6.4
ENROC. - A. ABAJO	245	- 21.6	- 7.2	- 17.2	- 4.4
NUCLEO - CENTRO	302	- 11.3	- 5.5	- 12.4	- 5.1
FILTRO - A. ABAJO	302	- 21.2	- 7.8	- 15.3	- 5.5
TRANS. - A. ABAJO	302	- 13.2	- 4.2	- 17.1	- 4.5

TABLA 3.8 . RESULTADOS DE ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA SECCION LONGITUDINAL MAXIMA. ELEVACION DEL TERRAPLEN 390

MATERIALES	CASO 2			CASOS 3 Y 7		
	E Ton/m <sup>2</sup>		Ton/m <sup>3</sup>	E Ton/m <sup>2</sup>		Ton/m <sup>3</sup>
NUCLEO	7000	0.45	1.90	6000	0.45	2.0
				7000	0.43	2.0
FILTRO Y TRANS.	7500	0.35	1.73	6000	0.30	1.9
				4000	0.25	1.3
ENROCAMIENTO SUBLTO	4300	0.20	1.63	3000	0.20	1.7
ENROCAMIENTO COMPACTO	6000	0.20	1.63	5000	0.25	1.3
				3000	0.20	1.7
ALUVION	6000	0.40	1.96	4000	0.35	1.0

TABLA 3.10 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS No 2

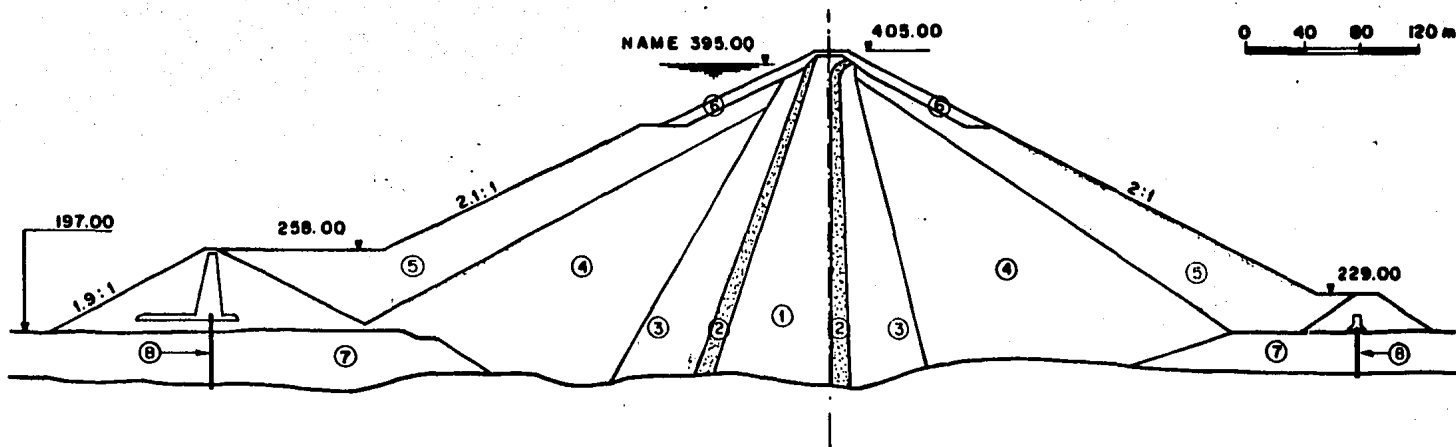
MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ Kg/cm <sup>2</sup>	R <sub>f</sub>	G	f	d
NUCLEO	800	0.4	2.0	0.9	0.4-0.3*	0.0	0
FILTRO	1200	0.35	2.5	0.9	0.35	0.2	4
TRANSICION	800	0.35	3.6	0.9	0.25	0.2	4
ENROCAMIENTO COMPACTO	700	0.30	3.6	0.7	0.20	0.2	5

\* El primer valor corresponde al utilizado en la sección transversal y el segundo a la sección longitudinal máxima.

TABLA 3.9 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA EL GRUPO DE ANALISIS No 1

MATERIALES	K Kg/cm <sup>2</sup>	n	$\nu$	$\phi$
TEJERIA	980	0.4	0.40	34°
COSTILLA	400	0.4	0.43	30°
ZONA HUMEDA	50	0.4	0.43	30°
ZONA SEMI- HUMEDA	160	0.4	0.43	30°

**TABLA 3.11 . PROPIEDADES DE LOS MATERIALES  
 PARA EL GRUPO DE ANALISIS No 3**



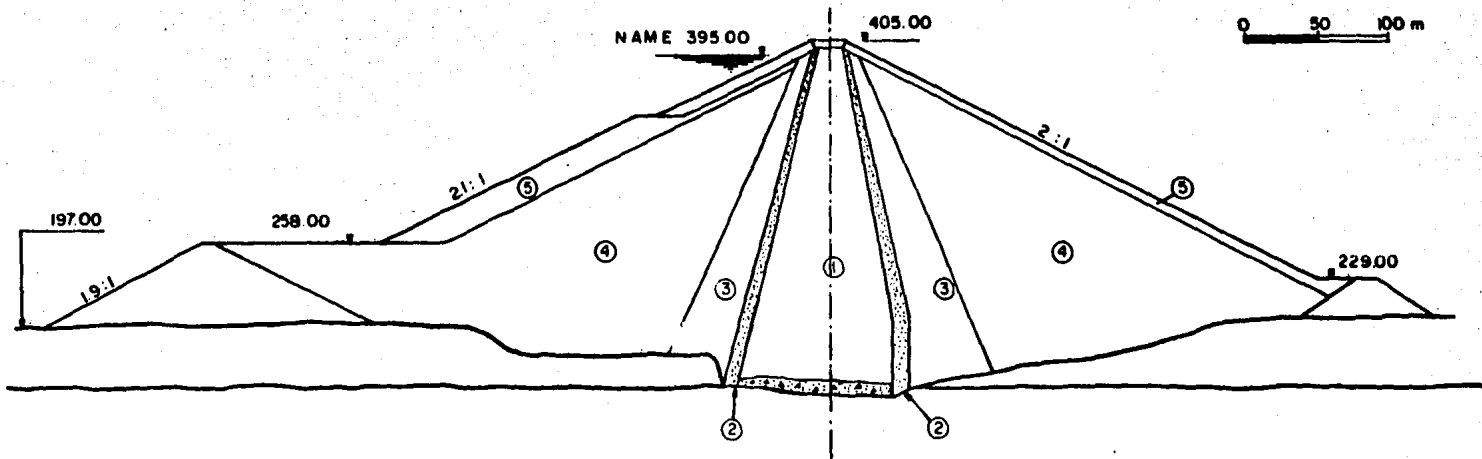
**SECCION ORIGINAL DE LA CORTINA  
NUCLEO INCLINADO**

- ① ARCILLA
- ② FILTRO
- ③ TRANSICION

- ④ ENROCAMIENTO COMPACTADO
- ⑤ ENROCAMIENTO ACOMODADO  
CON TRACTOR
- ⑥ ENROCAMIENTO DE GRAN TAMAÑO

- ⑦ DEPOSITOS DE RIO
- ⑧ PANTALLA IMPERMEABLE

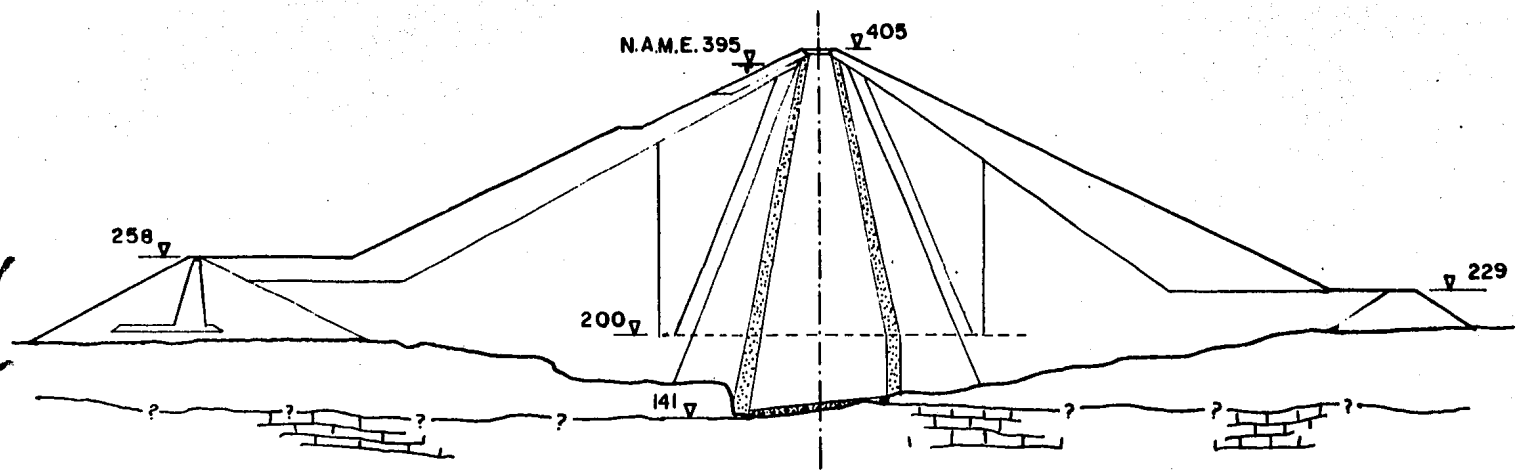
FIGURA 3.1



**1a MODIFICACION  
NUCLEO CENTRAL VERTICAL**

- ① NUCLEO IMPERMEABLE
- ② FILTROS
- ③ ZONAS DE TRANSICION

- ④ ENROCAMIENTO COMPACTADO
- ⑤ ENROCAMIENTO A VOLTEO



- NUCLEO IMPERMEABLE**
- MATERIAL TEJERIA
  - MATERIAL LA COSTILLA
  - FILTROS

- TRANSICIONES**
- ENROCAMIENTO COMPACTADO
  - ENROCAMIENTO SUELTO
  - ENROCAMIENTO UNIFORME

- ENROC. ACOMODADO CON TRACTOR**  
**ENROC. DE GRAN TAMAÑO**

**2a MODIFICACION**

**ZONAS CENTRALES DE ENROCAMIENTO SUELTO** →

**ARCILLA BLANDA JUNTO A LAS LADERAS** →

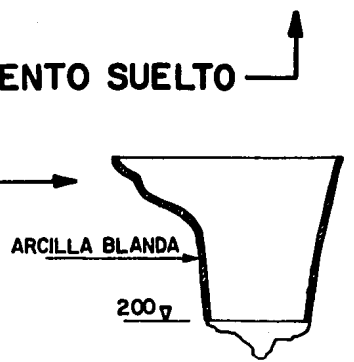


FIGURA 3.3

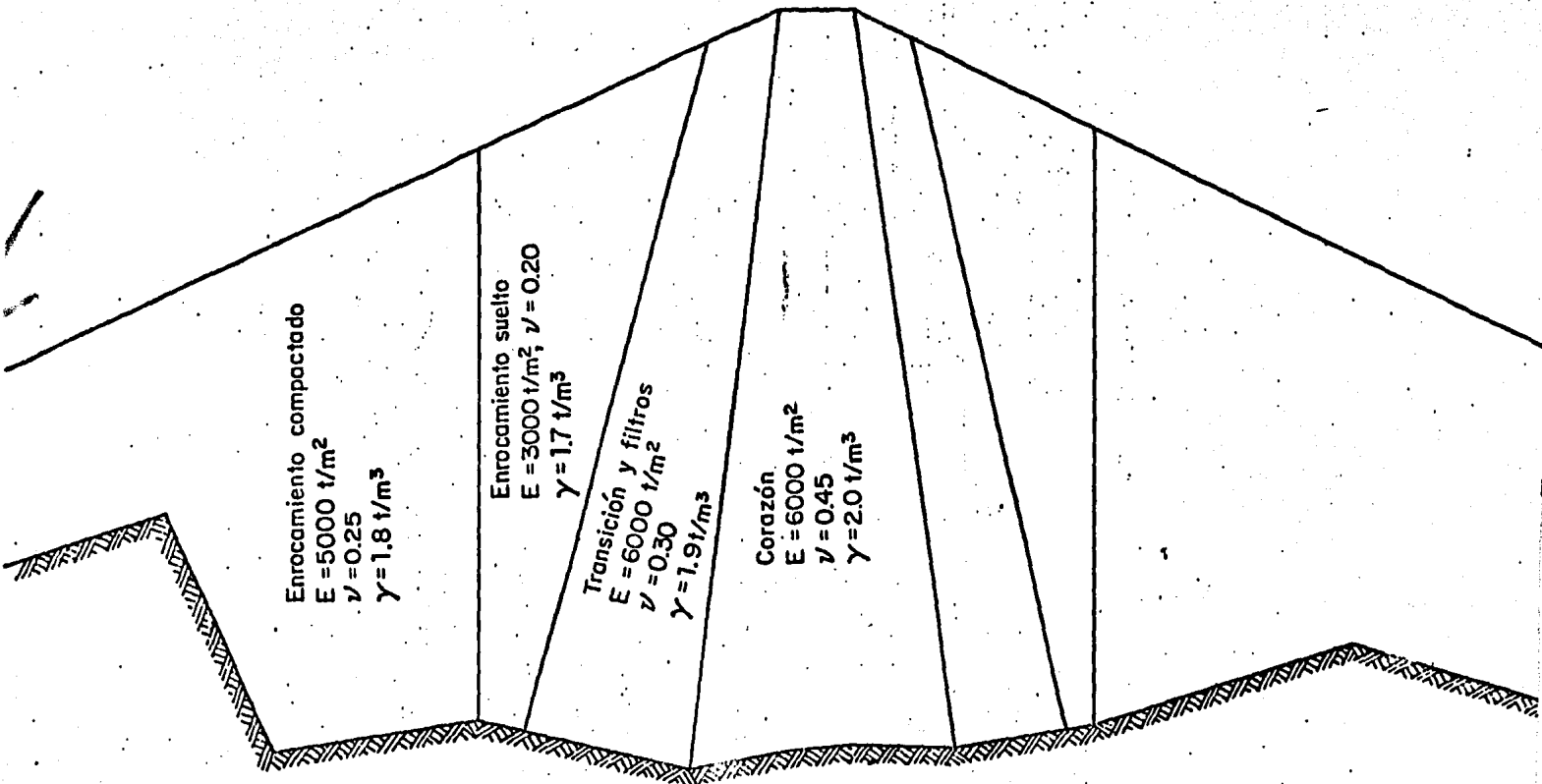


FIGURA 3.4 . DISTRIBUCION DE MATERIALES EN LA SECCION LONGITUDINAL. CASOS 3, 4 Y 5. REF ( 7 )

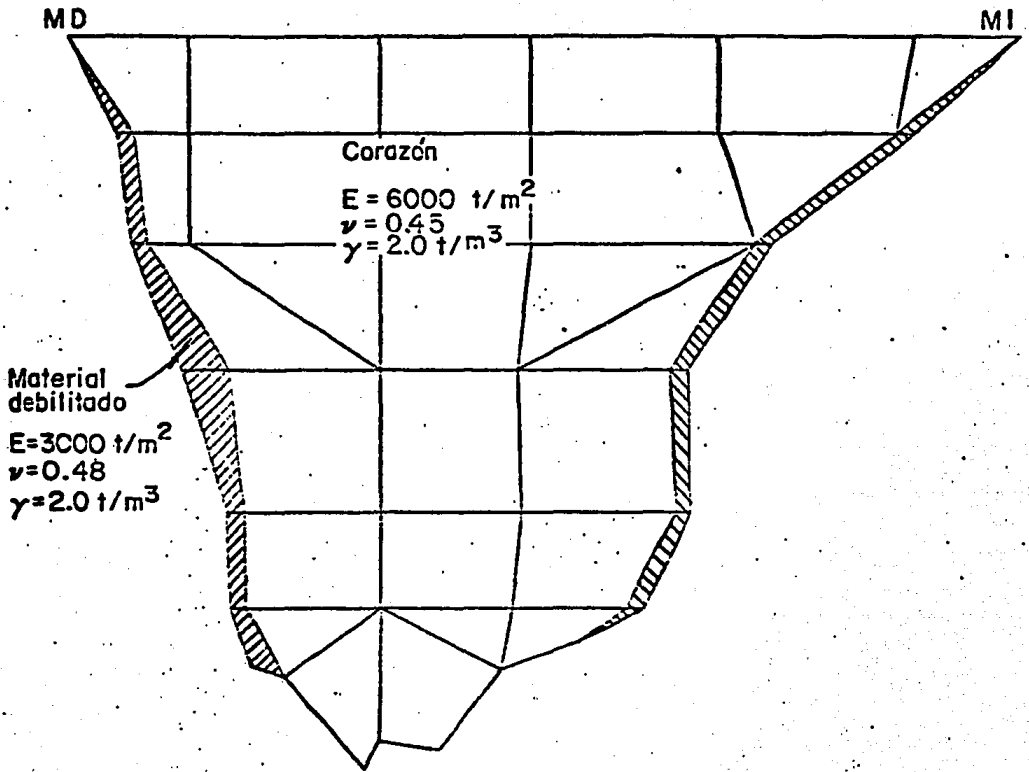


FIGURA 3.5 . DISTRIBUCION DE MATERIALES EN LA SECCION TRANSVERSAL  
REF( 7 )



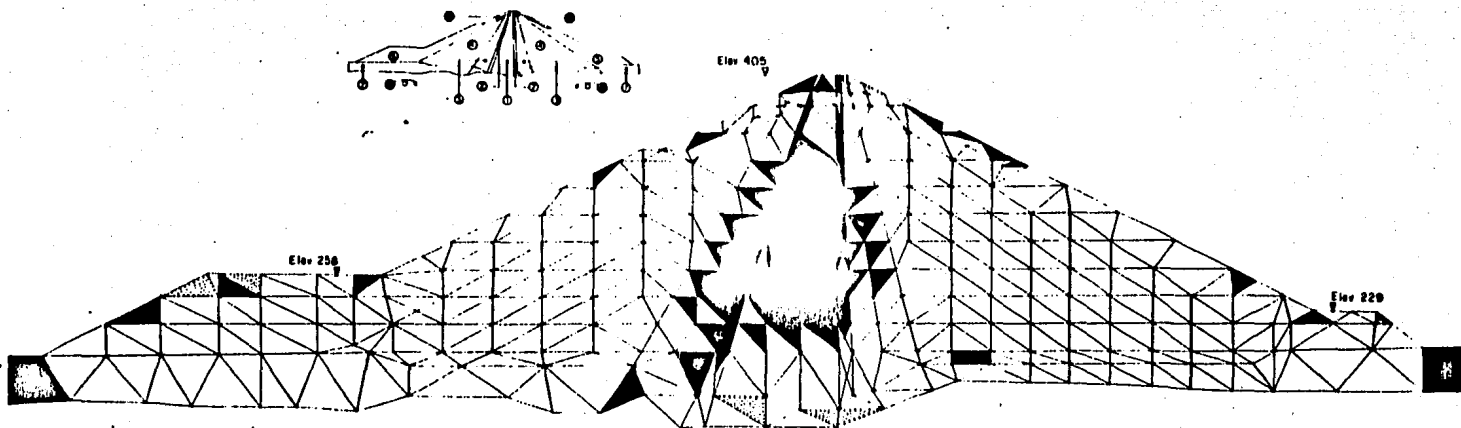


FIGURA 3.6 . ZONAS PLASTIFICADAS Y DE TENSION. GRUPO No 1 . REF( 6 )

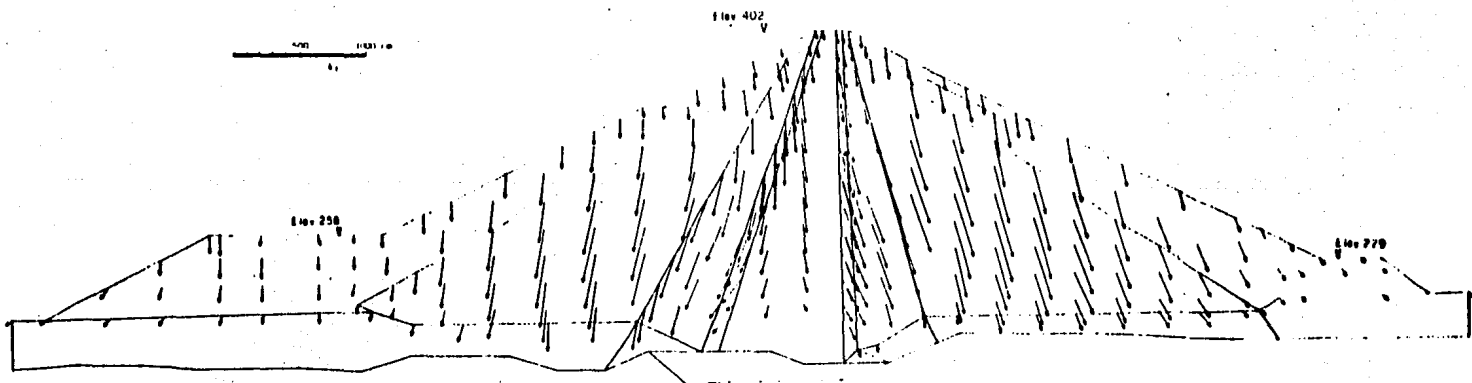




FIGURA 3.7 . DESPLAZAMIENTOS RESULTANTES. GRUPO No 1 . REF( 6 )

 Zona plastificada  
 Zona de tensión

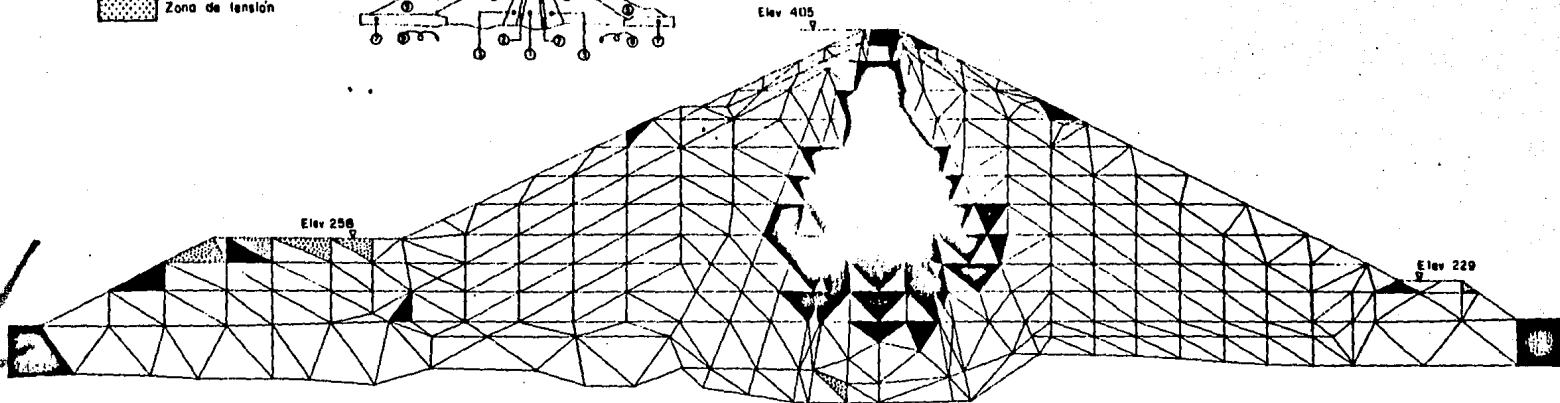
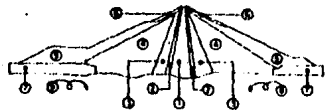


FIGURA 3.8 . ZONAS PLASTIFICADAS Y DE TENSION . GRUPO No 1 . REF( 6 )

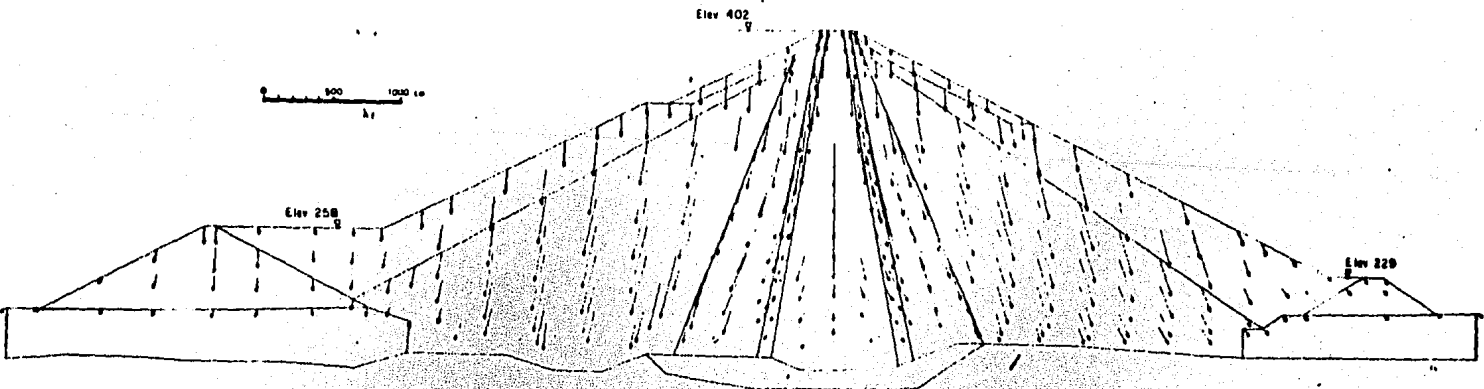
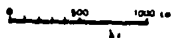


FIGURA 3.9 . DESPLAZAMIENTOS JUNTAMENTOS . GRUPO No 1 . REF( - 6 )

Andlisis estático  
5 capas

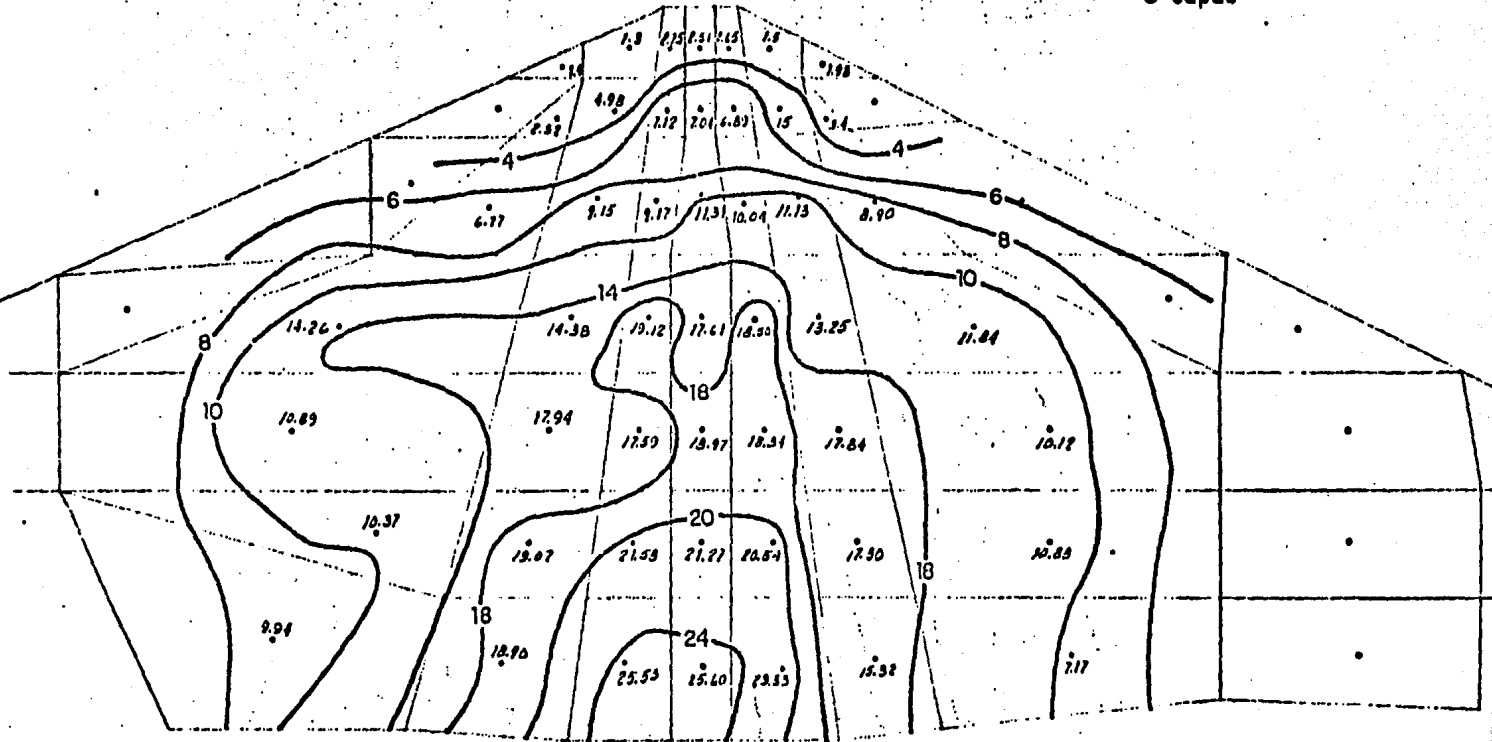
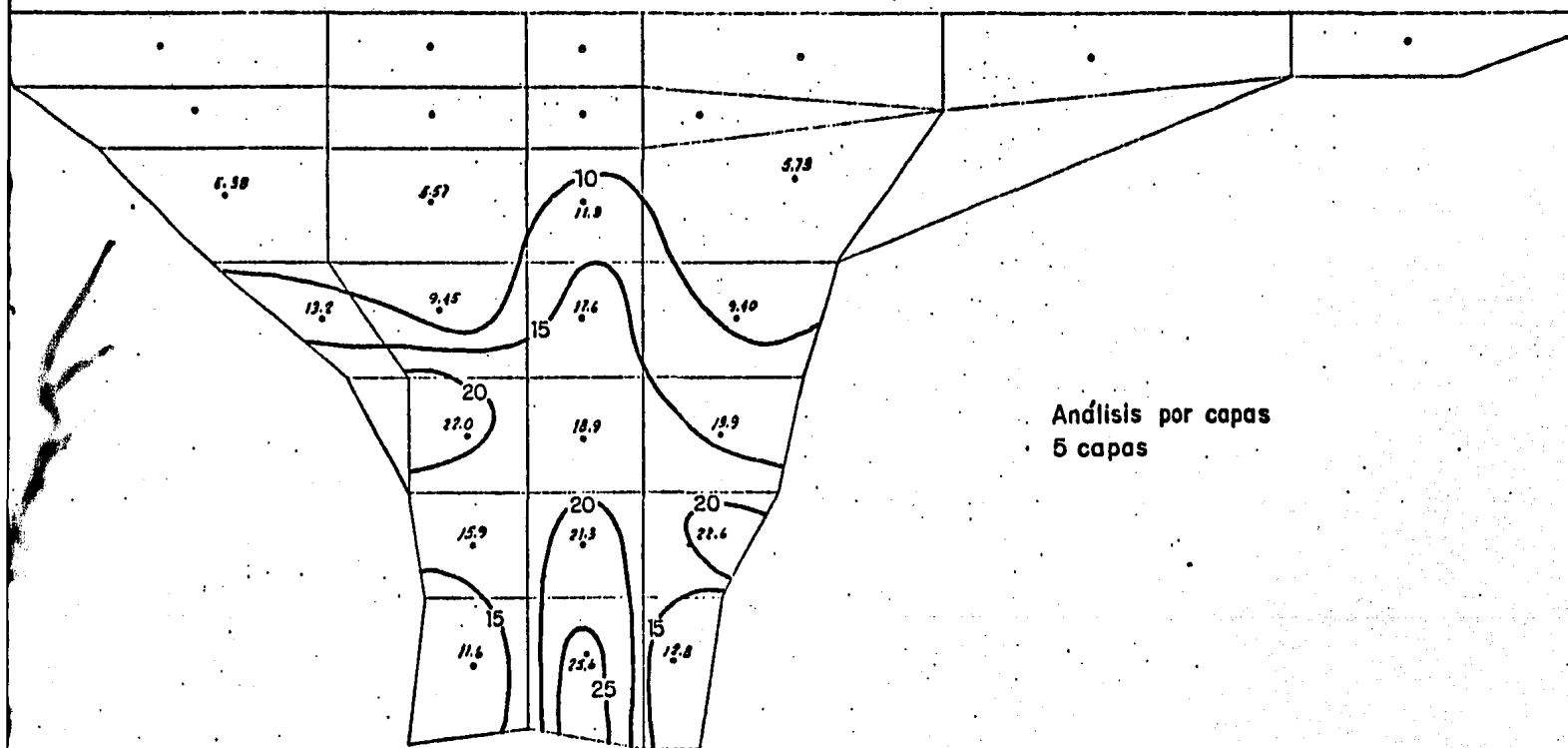


FIGURA 3.10 . CURVAS DE IGUAL ESPUEZCO VERTICAL, EN  $KG/CM^2$  . REF ( 7 )



Análisis por capas  
5 capas

FIGURA 3.11 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO VERTICAL, EN Kg/cm<sup>2</sup> . REF ( 7 )

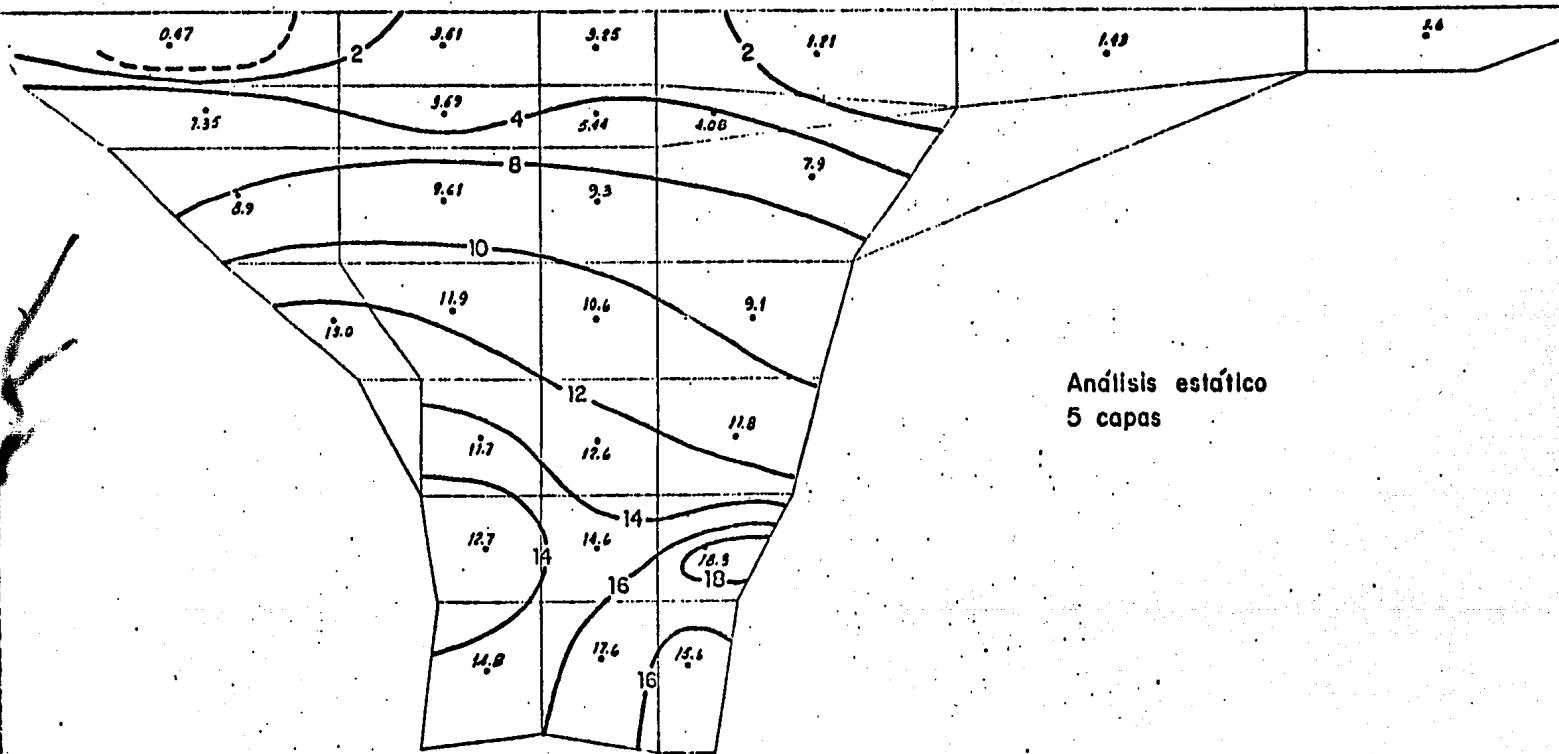


FIGURA 3.12 . CURVAS DE IGUAL ESPUEZO HORIZONTAL EN LA DIRECCION EJE CORTINA, EN Kg/cm<sup>2</sup> . REF ( 7 )

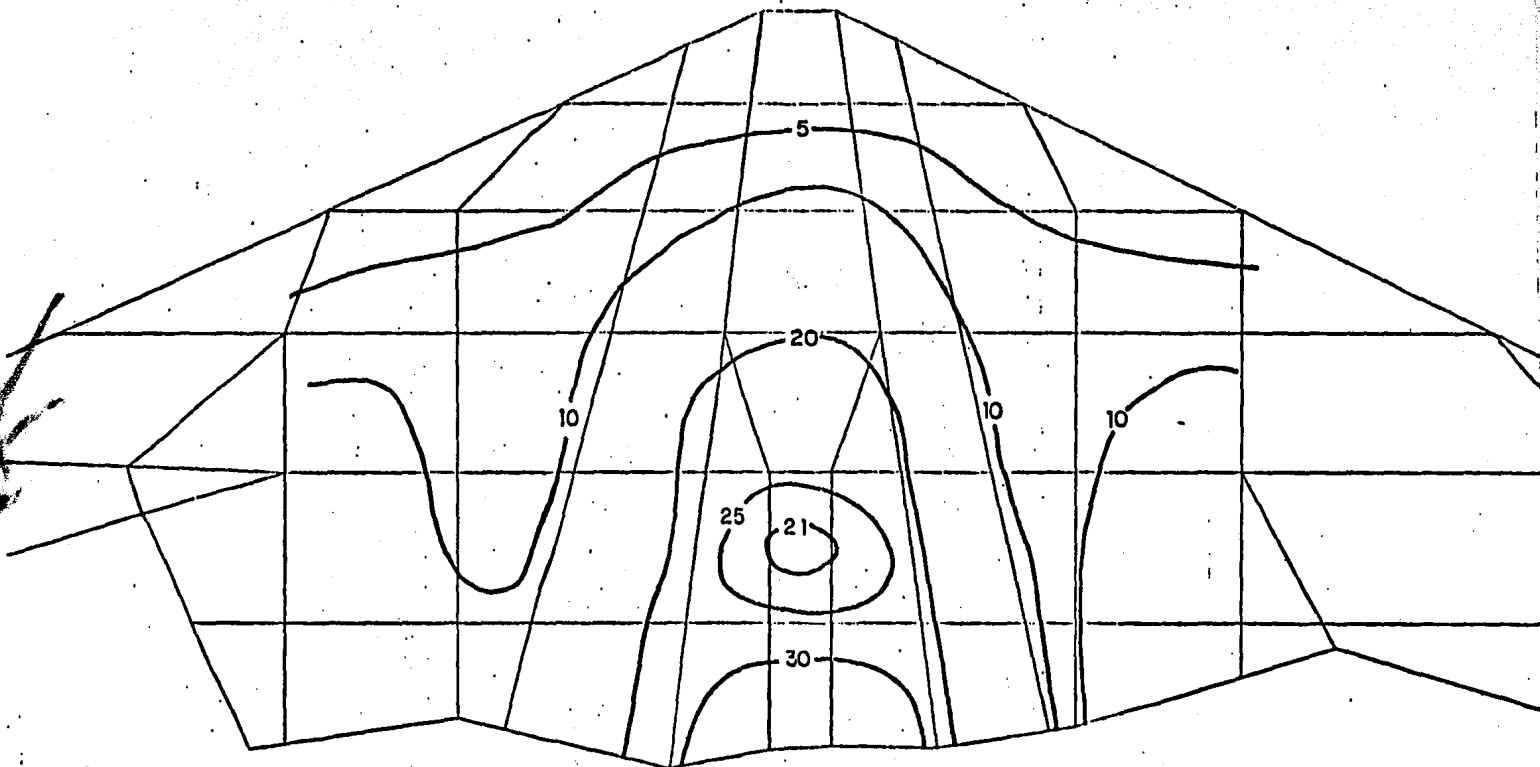


FIGURA 3.13 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO VERTICAL, EN  $\text{Kg/cm}^2$  . REF( 7 )

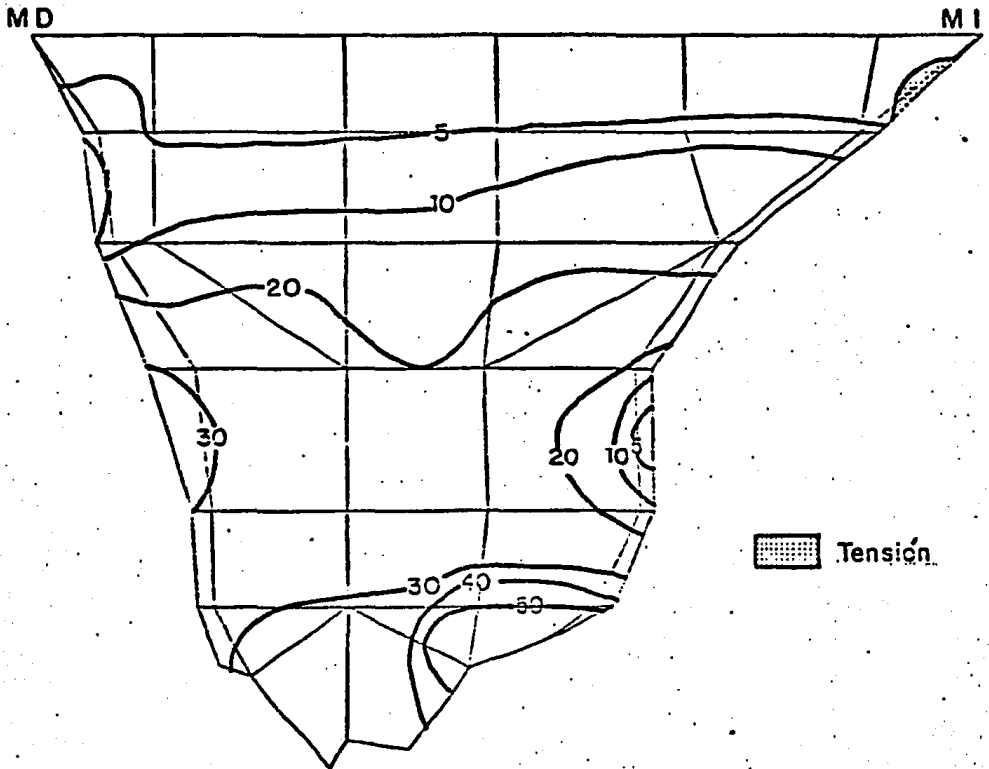


FIGURA 3.14 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO VERTICAL, EN  $Kg/cm^2$  . REF( 7 )

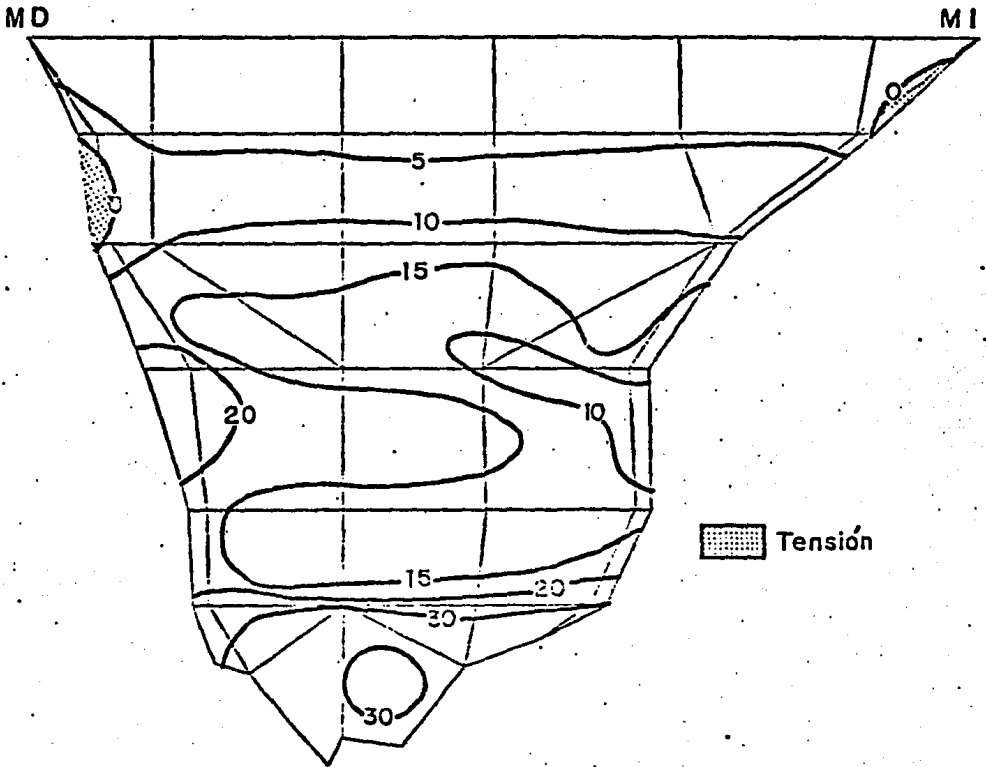


FIGURA 3.15 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO HORIZONTAL EN LA DIRECCION EJE CORTEZA, EN  $Kg/cm^2$  . REF( 7 )



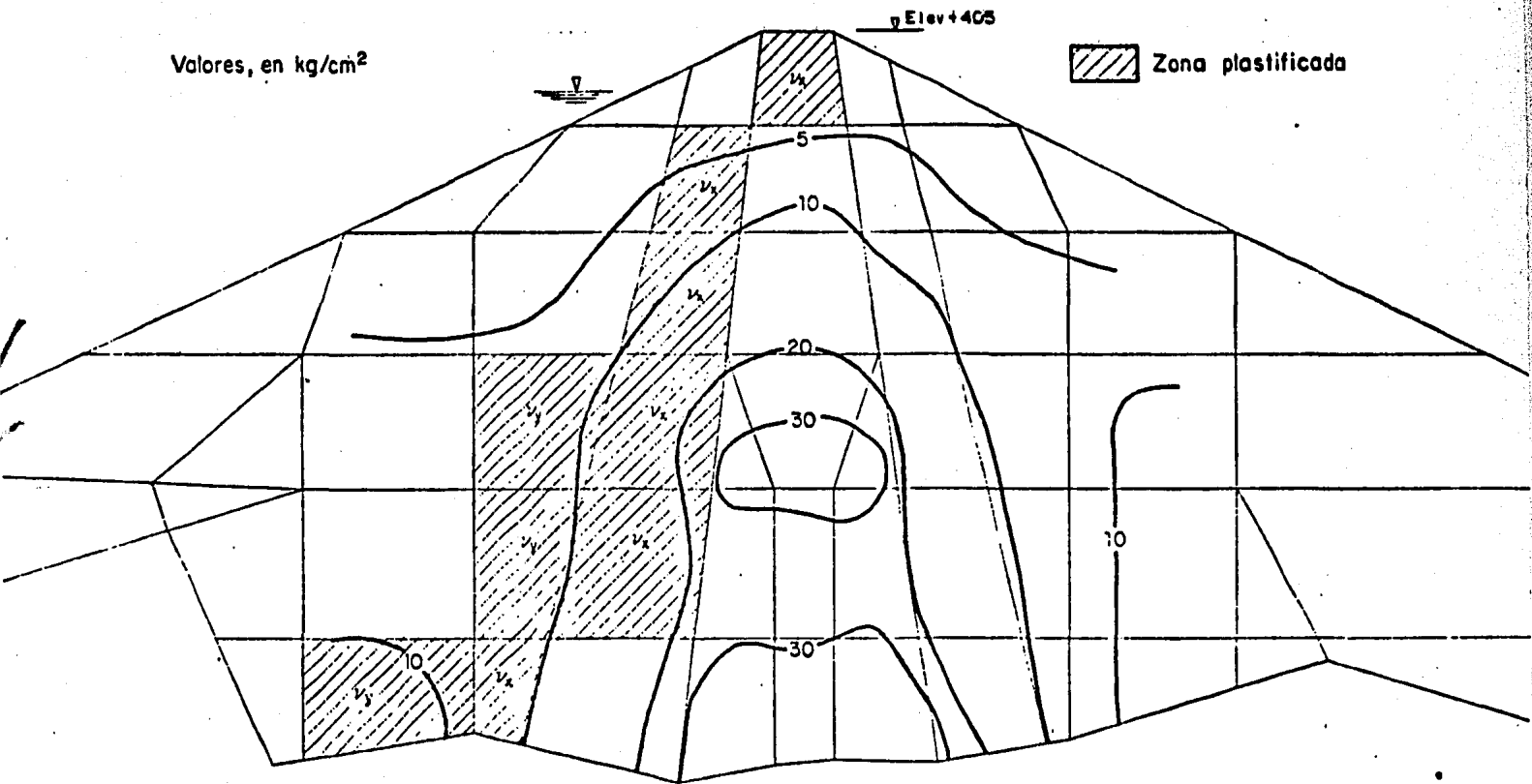


FIGURA 3.16 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO VERTICAL, EN  $\text{Kg/cm}^2$  CON EMBALSE LLENO. REF( 8 )

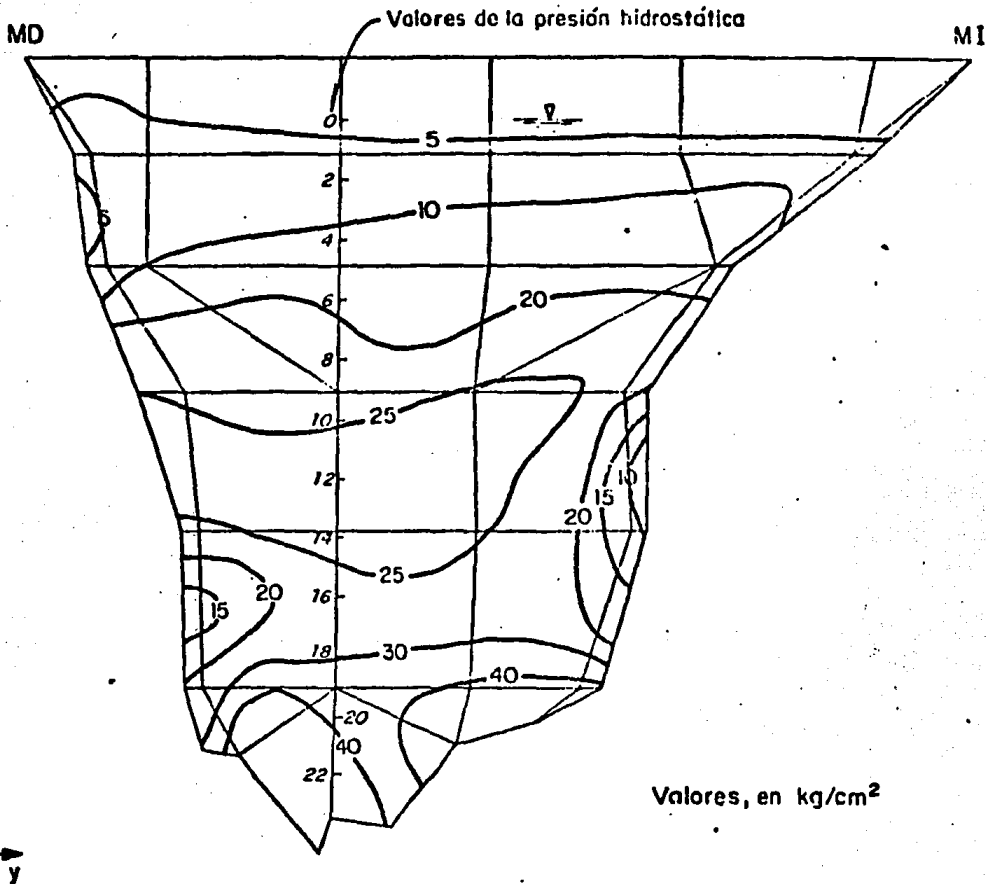


FIGURA 3.17 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO VERTICAL. EMBALSE LLENO. REF( 6 )

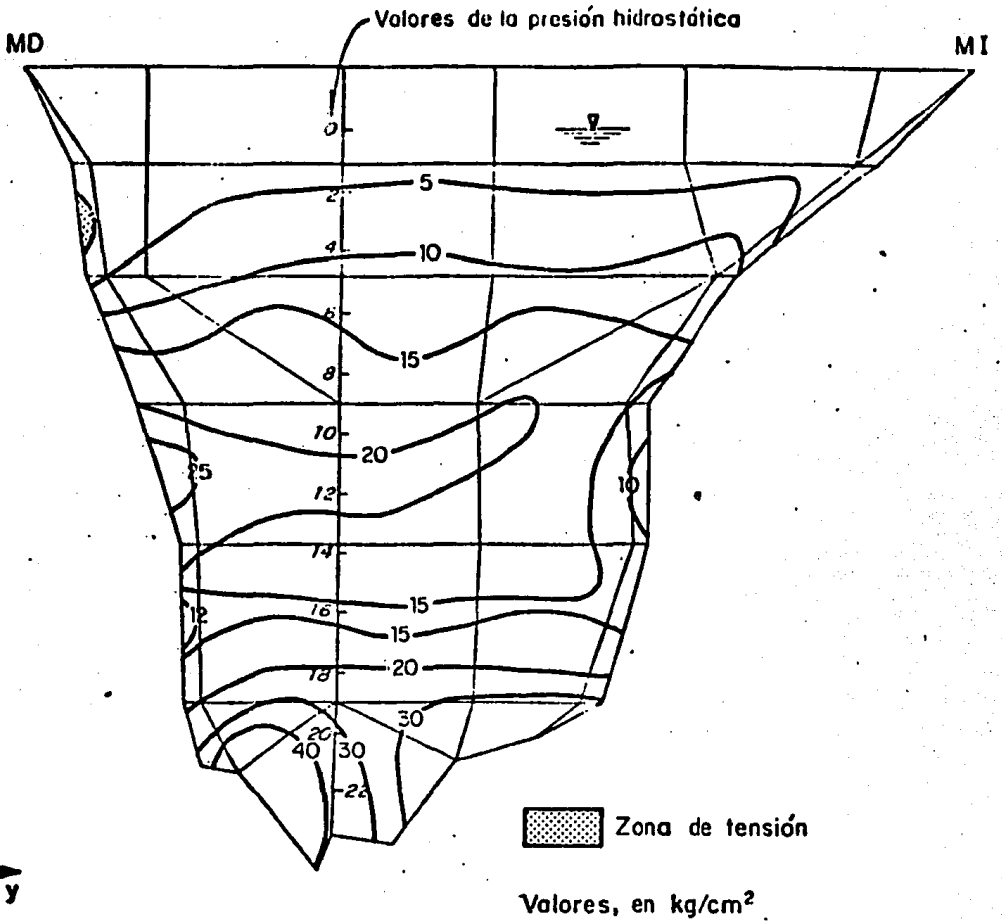


FIGURA 3.18 . CURVAS DE IGUAL ESFUERZO HORIZONTAL EN LA DIRECCION EJE CORTINA. ELDALSE LIENO. REF( 3 )

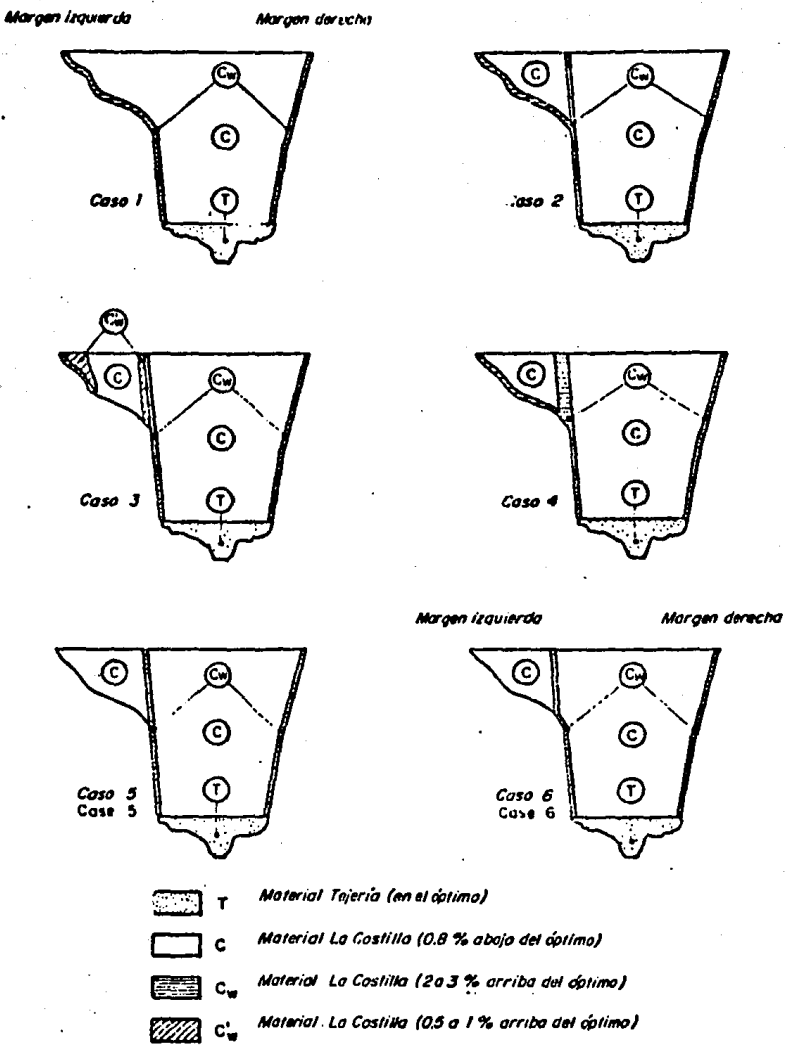


FIGURA 3.19 . DISTINTAS OPCIONES PARA LOCALIZACION Y ANCHURA DE LA FRANJA ARCILLOSA ELABIDA ADYACENTE A LAS LADERAS. REF( 9 )

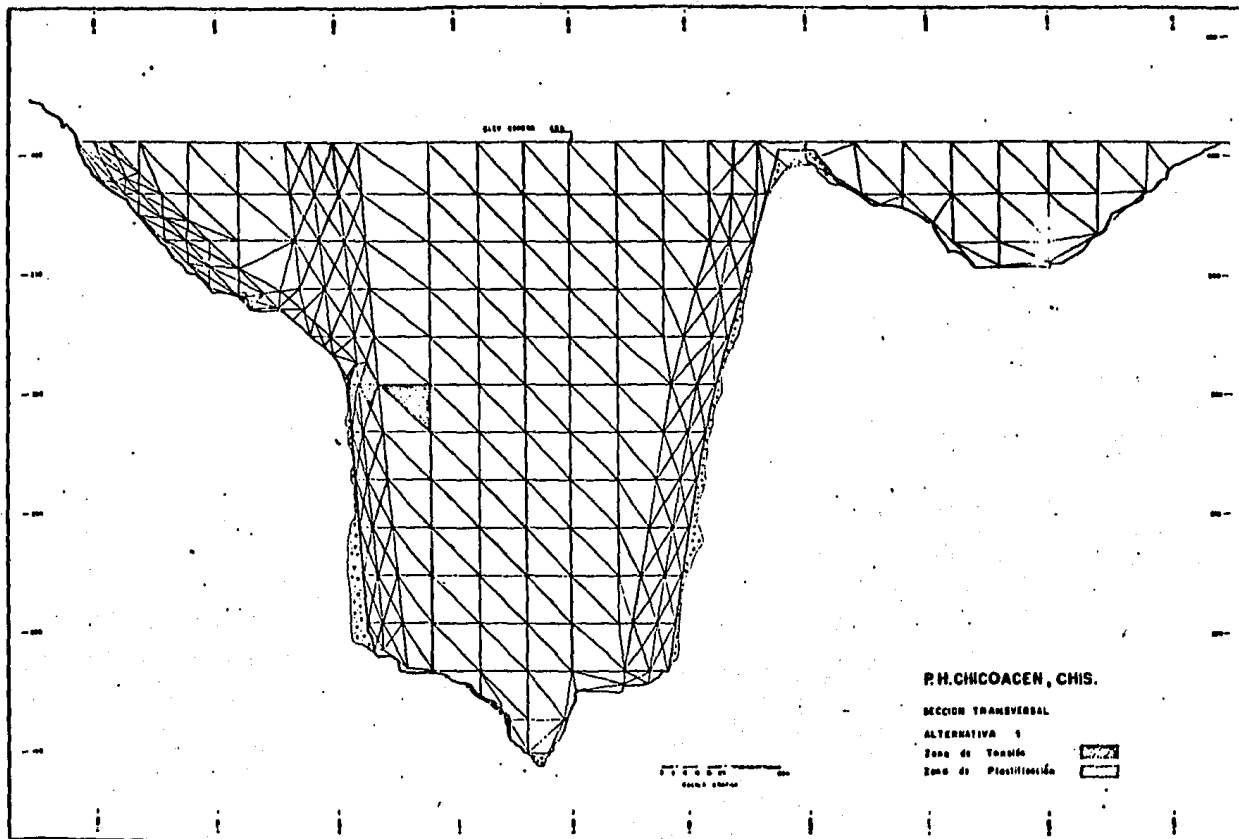


FIGURA 3.20 . ZONAS PLASTIFICADAS Y DE TENSION PARA EL CASO 1 DE LA FIGURA 3.19

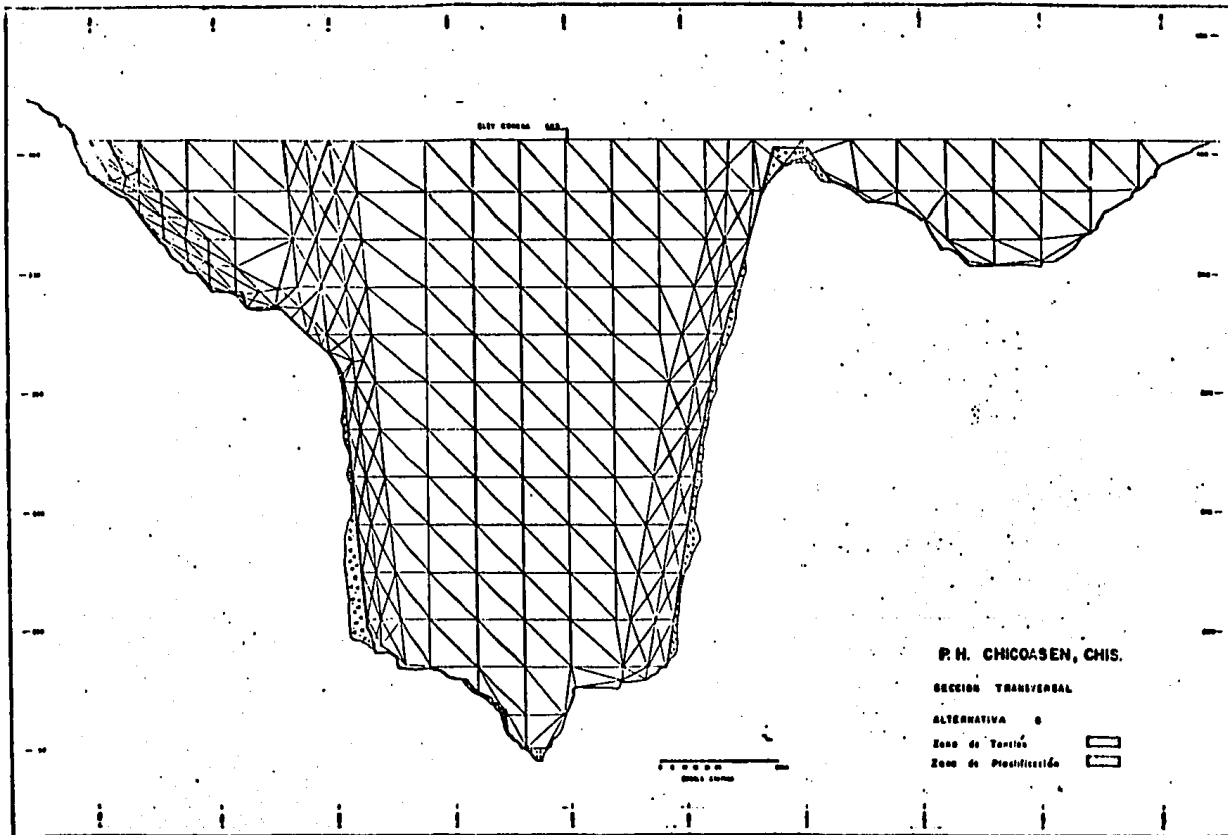


FIGURA 3.21 . ZONAS DE TENSION Y PLASTIFICADAS PARA EL CASO 6 DE LA FIGURA 3.19

#### 4. INSTRUMENTACION Y RESULTADOS

Con el objeto de observar el comportamiento de la presa durante las principales etapas de su vida útil, se proyectó la instalación de un vasto número de instrumentos, que permitieran la medición de esfuerzos y deformaciones en diversos puntos de la estructura.

En la figura 4.1 se muestra la localización de los diversos instrumentos; estos se hallan distribuidos en dos planos que coinciden con las secciones longitudinal y transversal máximas de la presa. La filosofía del plan general de la instrumentación proyectada, fué la de poder observar las zonas críticas identificadas en las etapas de diseño y construcción, con el objeto de poder valorar las resoluciones adoptadas.

La información que se presenta comprende el período de construcción hasta Diciembre de 1979, relacionada con la medición de esfuerzos y deformaciones en los Grupos de instrumentos comprendidos hasta la elevación 302 .

Se hará inicialmente una evaluación general de la confiabilidad que puede tenerse de las mediciones en los instrumentos, posteriormente se discutirá brevemente el comportamiento general de la presa y finalmente se hará referencia específica a lo relacionado con:

- a) Fenómeno de arqueado en la parte baja del cañón ;

b) Comportamiento de la zona húmeda,  
colocada en el contacto núcleo - laderas;

c) Iteración entre zonas de la presa.

#### 4.1 Evaluación de las mediciones de campo

##### 4.1.1 Tipo de Instrumentos

Los instrumentos instalados permiten obtener información de deformaciones unitarias, desplazamientos, esfuerzos totales y presiones de poro. En la Tabla 4.1 se listan los tipos de instrumentos instalados y las observaciones que pueden obtenerse de ellos. En ( 9 ), ( 11 ), ( 12 ) y ( 13 ) se presenta información detallada sobre el funcionamiento de los instrumentos.

En los Grupos 2 a 5 y 8 a 10 se instalaron celdas de presión y extensómetros en seis direcciones diferentes con el objeto de poder calcular el estado de esfuerzos y deformaciones en dichos puntos. Los vectores unitarios normales a los planos de medición se muestran en la Tabla 4.2 .

##### 4.1.2 Consideraciones respecto a la confiabilidad de las mediciones

Las mediciones de campo se ven afectadas por un sinnúmero de factores que afectan su exactitud. En principio, el colocar aparatos de medición en el interior de una estructura, como una presa de tierra, altera las características del medio al rededor de los sitios de medición.



Pueden enumerarse los siguientes factores generales que afectan la confiabilidad de las mediciones :

- a) Calidad de los Instrumentos, que involucra su capacidad de operar satisfactoriamente en el medio en que se instalen y la precisión en las mediciones que puedan obtenerse de ellos.
- b) Interacción entre el medio y el instrumento.
- c) Método y procedimiento de instalación.
- d) Métodos y procesos de lectura.

Cada tipo de instrumento involucra sus propias características, según las cuales uno u otro de los factores anteriores puede llegar a ser mas o menos importante.

La medición de esfuerzos normales involucra un problema de interacción entre la celda y el medio. Estas se instalan apoyadas en colchones de material fino ( Arcilla tarizada en el núcleo y arena fina en las zonas de materiales granulares ), dentro de trincheras. Estas son luego rellenas con el material típico de la zona de instalación, compactado con picos neumáticos o manuales, que no alcanzan a dar la compactación típica del material circundante. Esta diferencia de compactación de los materiales puede provocar fenómenos de arqueo que alteran las lecturas. Celdas de presión grandes ( 1 metro de diámetro ), minimizan el efecto de rigidez de los cantos, pero las lecturas pueden verse alteradas por la generación de esfuerzos de corte en el plano de medición.

Los extensómetros se instalan en trincheras, como las celdas, por lo que pueden presentarse los mismos problemas mencionados a este respecto anteriormente.

La instalación de los inclinómetros consiste en la prolongación de la tubería con el progreso en la construcción del terraplén. La protección de la tubería se logra mediante la colocación de material fino, en una zona adyacente al instrumento ( 30 cm en Chicoasén ). Se supone que los esfuerzos normales que se generan en la superficie de la tubería permiten que el medio arrastre la tubería en su movimiento.

Los calculos de estados de esfuerzos y deformaciones se alteran por los posibles cambios de direcciones respecto a las originales, que sufran los instrumentos.

La medición de las presiones de poro dependen principalmente del volumen de agua requerido por el instrumento para registrar los cambios de presión. Debido a esto se usan piezómetros de diafragma para la medición de presiones de poro en materiales de baja permeabilidad. La característica de la piedra porosa influye en las mediciones.

#### 4.1.3 Comparación de mediciones

##### 4.1.3.1 Esfuerzos normales

En algunos de los Grupos de celdas instalados en Chicoasén, se han duplicado las lecturas. Las variaciones que se obtie-

Los extensómetros se instalan en trincheras, como las celdas, por lo que pueden presentarse los mismos problemas mencionados a este respecto anteriormente.

La instalación de los inclinómetros consiste en la prolongación de la tubería con el progreso en la construcción del terraplén. La protección de la tubería se logra mediante la colocación de material fino, en una zona adyacente al instrumento ( 30 cm en Chicoasén ). Se supone que los esfuerzos normales que se generan en la superficie de la tubería permiten que el medio arrastre la tubería en su movimiento.

Los calculos de estados de esfuerzos y deformaciones se alteran por los posibles cambios de direcciones respecto a las originales, que sufran los instrumentos.

La medición de las presiones de poro dependen principalmente del volumen de agua requerido por el instrumento para registrar los cambios de presión. Debido a esto se usan piezómetros de diafragma para la medición de presiones de poro en materiales de baja permeabilidad. La característica de la piedra porosa influye en las mediciones.

#### 4.1.3 Comparación de mediciones

##### 4.1.3.1 Esfuerzos normales

En algunos de los Grupos de celdas instalados en Chicoasén, se han duplicado las lecturas. Las variaciones que se obtie-

nen en sus lecturas son muy significativas, ya que son el mismo tipo de celdas, instaladas y leídas siguiendo una misma metodología.

En las figuras 4.2 a 8 se muestra la comparación cuantitativa de estas lecturas. Se especifica para cada caso la dirección de la medición duplicada, así como también el Grupo de instrumentos a la que pertenece.

La correspondencia entre las lecturas de las celdas del Grupo 1 es muy buena, figura 4.2. En el Grupo 10, se presentan en cambio diferencias apreciables, atribuibles en principio a una falla de la celda B, figura 4.3. En efecto, esta celda registra poca variación en los esfuerzos bajo la imposición de los primeros incrementos de carga del terraplén.

En las figuras 4.4 a 8 se muestran los resultados comparativos de esfuerzos medidos en la dirección del río,  $0^\circ$ , y en planos a  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . Las discrepancias oscilan entre 40 y 60% de la lectura menor. Es muy difícil establecer explicaciones concluyentes respecto a las causas de estas diferencias. Variaciones en la calidad de las celdas y fallas en los procedimientos de instalación, se citan como las causas más posibles de estas discrepancias.

Por la evidencia anterior, son de esperarse estas variaciones en los valores de esfuerzos normales leídos en los diferentes Grupos.

#### 4.1.3.2 Deformaciones unitarias verticales

Como puede observarse en la figura 4.1, en las cercanías de la localización de los Grupos de extensómetros se han instalado también inclinómetros. En estos instrumentos además de las lecturas de deformaciones horizontales tradicionales, se efectúan lecturas con cinta, con el objeto de determinar los desplazamientos y deformaciones unitarias verticales .

Se ha efectuado una comparación entre los resultados de deformaciones unitarias verticales de estos dos tipos de instrumentos.

En las figuras 4.9 a 16 se presentan las comparaciones efectuadas en los Grupos 2 a 6 . En todos los casos analizados las deformaciones registradas en los extensómetros son mayores. Las tendencias cualitativas, sin embargo, son similares. Para cuantificar tales diferencias, se elaboraron las figuras 4.12, 13 y 16, en las que se muestran las relaciones existentes entre las deformaciones. Como una indicación, se presentan líneas auxiliares que permiten tener una idea de las relaciones entre una y otra. En el núcleo, las deformaciones de extensómetros son mayores entre un 30 y 70%, mientras que en el filtro y enrocamiento son de 60 y 30% respectivamente. Estas relaciones se conservan aproximadamente constantes, lo que indica que las discrepancias son independientes del tiempo y del nivel de esfuerzos.

El diseño de estos dos tipos de instrumentos es bien diferente. En los inclinómetros las compresiones de las capas se obtienen de la medición de distancias desde la boca de la tubería, a los extremos inferiores de los tubos. En los extensómetros en cambio, se miden los desplazamientos relativos entre dos placas de referencia ( separadas 2.5 metros entre sí ) mediante una resistencia eléctrica. En la sección 4.1.2 se hizo una breve mención de las técnicas de instalación de cada uno de estos tipos de aparatos. En forma simple, puede decirse que un inclinómetro es una tubería compuesta de secciones de 1.7 mts, unidas con secciones telescópicas, con una zona ( de 30 cm de radio ) de material mas fino y de características de compresibilidad diferentes a la del material típico circundante. Los extensómetros constan de dos placas unidas por un vástago móvil, embebidas en un material mas compresible ( por la imposibilidad de alcanzar con métodos manuales la compactación típica de campo ) que rellena la trinchera de instalación.

De acuerdo a lo anterior pueden mencionarse en forma general algunas posibles causas de las discrepancias en las lecturas. En los inclinómetros puede presentarse un corrimiento relativo entre la tubería y el material adyacente . Para que esto ocurra, la resistencia al deslizamiento en las uniones telescópicas del instrumento debe ser mayor que la fricción que se genera entre la tubería y el material circundante. En los extensómetros la influencia del material colocado adyacente al instrumento, que como se mencionó anteriormente no tiene

Las mismas características de compactación que el material típico de la zona correspondiente, podría provocar lecturas de deformación altas. Desplomes respecto a la posición vertical inicial son posibles .

Para minimizar los corrimientos relativos de la tubería de los inclinómetros respecto al material adyacente, es común colocar en los tubos listones horizontales que permitan un anclaje con el material circundante.

#### 4.2 Comportamiento general de la presa

##### 4.2.1 Estado de esfuerzos

Las mediciones de esfuerzos normales medidos en los once Grupos de instrumentos instalados hasta la elevación 302 se muestran en las figuras 4.17 a 27 . Como referencia se muestran las presiones verticales calculadas en base al peso propio de los materiales,  $\delta'z$  . Con rigor, solo en un medio semi-infinito, en reposo, los esfuerzos verticales en cualquier punto de la masa corresponderán al valor  $\delta'z$  . La solución elástica al problema de un prisma triangular con pendientes 1.5 : 1.0, indica que a lo largo del eje central, los esfuerzos verticales corresponden solo a un 75% de  $\delta'z$  . Qué tanto discrepan las lecturas reales de la presión nominal del relleno, puede observarse en estas figuras. En la parte inferior del núcleo el nivel de esfuerzos es muy bajo, figura 4.17, mientras que en el filtro de aguas abajo, figuras 4.22 y 25, ocurre lo contrario. En las demás localizaciones se tienen comportamientos in

termedios.

En los Grupos en que se instalaron celdas en seis direcciones diferentes, se muestran, por simplicidad, solo los esfuerzos en las direcciones de los ejes coordenados de la presa, eje vertical ( Z ), eje río ( Y ) y eje cortina ( X ), y en la dirección  $45^\circ$  en el plano ZY, ya que se comprobó que las direcciones seleccionadas no eran las adecuadas para permitir el cálculo de los esfuerzos principales. La posición intermedia del esfuerzo a  $45^\circ$  entre los esfuerzos verticales y horizontales indica que en las localizaciones de los Grupos colocados a lo largo del eje central del núcleo, Grupos 1 y 3, las direcciones de esfuerzos principales coinciden con los ejes coordenados, figuras 4.18 y 19. Situaciones mas complejas se presentan en las zonas aledañas al núcleo y en las cercanías de la ladera izquierda. Exceptuando los Grupos 4 y 3, instalados en el filtro de aguas abajo en las elevaciones 245 y 302, figuras 4.22 y 25, los demás Grupos registran esfuerzos horizontales practicamente iguales.

#### 4.2.2 Presiones de poro

Se han registrado presiones de poro en el interior del núcleo en las elevaciones 152 y 190, figuras 4.17 y 18. Respecto a los esfuerzos verticales registrados en estas localizaciones, las presiones de poro alcanzan valores de 50 y 30, respectivamente. Los esfuerzos efectivos en las partes bajas del cañón son, por tanto, extremadamente bajos. Conviene mencionar que los



niveles de agua del respaldo de aguas arriba de la presa han oscilado entre las elevaciones 200 y 220 desde Agosto de 1977.

#### 4.2.3 Estados de deformaciones

Las mediciones de deformaciones unitarias se muestran en las figuras 4.28 a 35. La selección de las mediciones mostradas se ha hecho siguiendo el mismo criterio mencionado para los Grupos de celdas.

La concordancia entre las direcciones de esfuerzos y deformaciones son aceptables, teniendo en cuenta las limitaciones de los instrumentos de medida. Los valores de las deformaciones en las diferentes direcciones muestran que en la sección longitudinal máxima de la presa se presenta un estado aproximado de deformación plana. Las discrepancias mayores se presentan en el Grupo 5, colocado en el enrocamiento en la elevación 245, figura 4.32, y en el Grupo 6 del filtro en la elevación 302, figura 4.29.

En la sección transversal máxima, a lo largo del eje central las deformaciones ocurren en el plano perpendicular, y junto a la ladera izquierda, figura 4.34 y 35, se tiene un estado triaxial de deformaciones.

#### 4.2.4 Zonas de plastificación

Aprovechando la condición de deformación plana que se presenta en la sección longitudinal máxima de la presa, se han calcula

do los esfuerzos principales y se han elaborado los diagramas p - q para los diferentes Grupos, figura 4.36 a 39 . Para cada Grupo, dependiendo del tipo de material en que se encuentren, se muestra la envolvente de falla. De las comparaciones respectivas se concluye que se presentan zonas de plastificación en el núcleo, en las cercanías de los Grupos 2 y 3, figuras 4.36 y 37 , y en el filtro en la elevación 302, figura 4.38.

Cuando se alcanza la falla en un suelo se destruye su estructura inicial, cambiando consecuentemente sus características de compresibilidad iniciales. La creación de zonas de plastificación en la presa, implica la presencia de zonas de material más compresible, que bajo la sollicitación de esfuerzos adicionales, como la carga del embalse, pueden provocar desplazamientos apreciables de la presa.

#### 4.3 Análisis de problemas especiales de la presa

##### 4.3.1 Fenómeno de arqueo en la parte baja del cañón

Se analizarán los esfuerzos verticales medidos a lo largo del eje central del núcleo, en los Grupos Cz - AB, 1, 3 y 7.

El desarrollo de los esfuerzos normales verticales con el avance del terraplén se muestran en la figura 4.40. La variación de los esfuerzos con el aumento del peso del relleno es evidente para todos los Grupos, con excepción del Grupo Cz-AB.

En este Grupo la variación de los esfuerzos verticales es despreciable a partir de una presión del relleno igual a  $14 \text{ Kg/cm}^2$  correspondiente a una elevación del relleno de 221 mts. Es importante hacer notar que para intervalos de carga del terraplén entre 0 y  $14 \text{ Kg/cm}^2$  los decarrollos de presiones verticales en los Grupos Cz-AB, 3 y 7 son muy similares.

La posibilidad de un mal funcionamiento de la celda existe. Sin embargo, en la misma elevación 152 se halla instalada la celda Cz-A6 en las cercanías del filtro de aguas arriba, que muestra que los esfuerzos verticales siguen una tendencia idéntica a la registrada en la parte central, figura 4.17.

En la figura 4.41 se muestran dos diagramas de esfuerzos verticales a lo largo del eje central del núcleo, correspondientes a las elevaciones 221 y 310. Para efectos comparativos se muestra el diagrama correspondiente a  $0.75 \delta z$ . Los valores registrados en los Grupos 1, 3 y 7 quedan aproximadamente alineados entre valores de 0.4 y 0.7 de  $\delta z$ , figura 4.40.

Se estima que los bajos esfuerzos presentados en la parte inferior del núcleo se deben a una fuerte interacción entre el relleno y las laderas. Aunque también es posible la interacción núcleo - filtros, que como se verá mas adelante existe, se atribuye a este efecto una influencia menor. El estudio de los resultados de los análisis numéricos, permitirán tener una visión mas clara de la ocurrencia de estos dos fenó

menos.

#### 4.3.2 Interacción núcleo-laderas

La información de los Grupos 3 y 6, elevación 245, y 7 y 10, elevación 302, se utilizarán para analizar este fenómeno.

En las figuras 4.42 y 43 se muestra la variación de los esfuerzos verticales leídos en estos Grupos con el aumento de la carga del terraplén. En ambas elevaciones se aprecia que para cualquier elevación del terraplén, los esfuerzos en las cercanías de las laderas son mayores que en la parte central del núcleo. Esto sugiere que en ambas elevaciones están ocurriendo fenómenos de interacción núcleo-laderas.

En el Capítulo 3, se mencionó que la filosofía de colocar una franja ras húmeda en el contacto núcleo-laderas, era la de crear una zona de material menos resistente. Este al deformarse bajo cargas altas produciría una reducción del efecto de arco. Para investigar el comportamiento mecánico de las zonas cercanas a las laderas y a la parte central del núcleo, se elaboraron para la elevación 245, las curvas esfuerzo - deformación de campo. Se utilizaron para los cálculos de deformaciones tanto los datos de inclinómetros como de extensómetros, figuras 4.44 y 45. Los resultados relativos para los diferentes materiales es idéntico, independientemente de las deformaciones usadas. De estas relaciones puede observarse que para igual nivel de esfuerzos vertical medido, las deformaciones

correspondientes en las cercanías de la ladera izquierda, Grupo 6, son mayores que los de la parte central.

Para los Grupos de la elevación 302 se calcularon las deformaciones unitarias verticales de los inclinómetros. Desafortunadamente el inclinómetro que pasa cerca del Grupo 10 presentó fallas, perdiéndose gran parte de la información inicial, figura 4.46. Teniendo en cuenta la información disponible se elaboró la figura 4.47, donde solo es válido comparar las pendientes de las curvas para un mismo nivel de esfuerzos. Observando la tendencia registrada en el centro del núcleo, Grupo 7, puede inducirse la mayor deformabilidad del material cercano a la ladera, Grupo 10, respecto a la parte central del núcleo.

De los razonamientos anteriores se concluye que existen fenómenos de interacción aún a estas elevaciones ( 245 y 302 ), y que además el material en las proximidades de la ladera izquierda se está comportando según lo previsto.

#### 4.3.3 Interacción entre zonas de la presa

Los esfuerzos registrados en el filtro de aguas abajo en las elevaciones 245 y 302 son mas altos que en el núcleo y enrocamientos, figuras 4.19, 20 y 22 a 25. Es importante apreciar que la magnitud de los esfuerzos verticales en los Grupos 4 y 3 alcanzan valores muy próximos a la presión del relleno, en contraste con los valores de dichos esfuerzos en el núcleo,

Grupos 3 y 7, y en el enrocamiento y transición, Grupos 5 y 9.

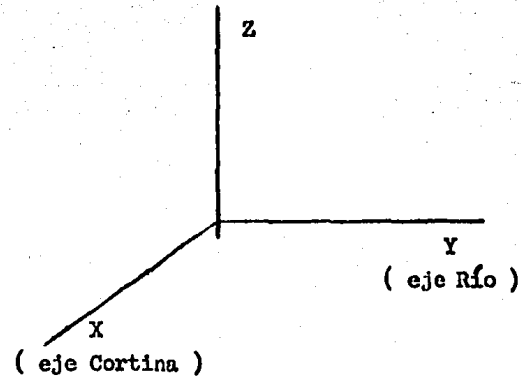
En las figuras 4.44 y 45 se presentan también las curvas esfuerzo-deformación para el filtro y enrocamiento en la elevación 245. El núcleo y enrocamiento presenta características de compresibilidad mayores que el filtro. Esto provoca que estas zonas transfieran cargas al filtro y es la razón por lo que en esta zona los esfuerzos registrados son apreciablmente mayores.

Aunque no es posible hacer un análisis comparativo similar en la elevación 302, por presentarse fallas en algunos instrumentos, los niveles de esfuerzos que se presentan en esta elevación hacen suponer que también se están presentando fenómenos de interacción apreciables, similares a los descritos para la elevación 245.

TIPO DE INSTRUMENTO	TIPO DE MEDICION
Inclinómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamientos Horizontales y Verticales</li> <li>• Deformaciones unitarias verticales</li> </ul>
Medidores Hidraulicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamientos Verticales</li> </ul>
Extensómetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformaciones Unitarias: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verticales</li> <li>• Horizontales</li> <li>• Inclinadas</li> </ul> </li> </ul>
Celdas de presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzos totales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verticales</li> <li>• Horizontales</li> <li>• Inclinados</li> </ul> </li> </ul>
Piezómetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presiones de Poro</li> </ul>

TABLA 4.1 . TIPOS DE INSTRUMENTOS INSTALADOS

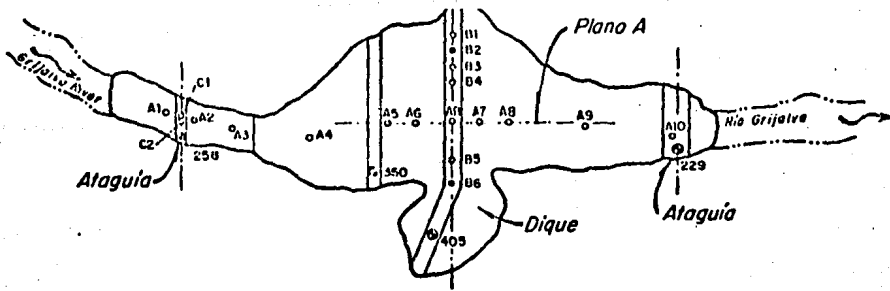
CELDA	COSENO DIRECTOR		
	i	j	k
$C_z$	0	0	1
$C_x$	1	0	0
$C_y$	0	1	0
$C_{15^\circ}$	0	$1/2$	$1/2$
$C_{D1}$	$-1/3$	$1/3$	$1/3$
$C_{D2}$	$1/3$	$-1/3$	$1/3$



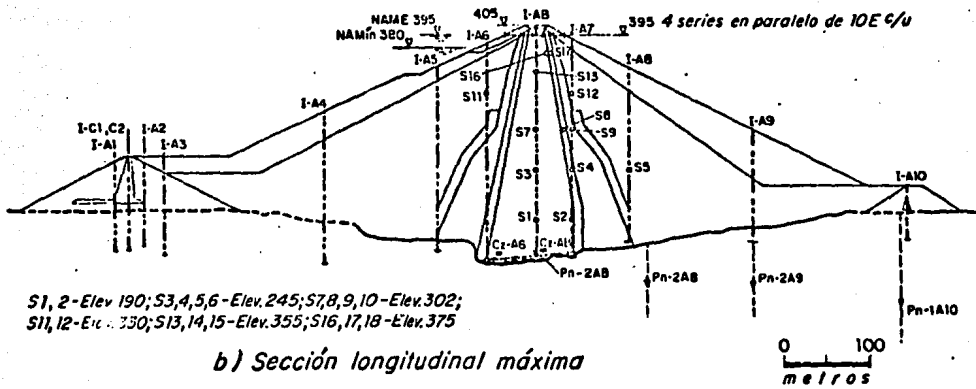
EJES COORDENADOS DE LA PRESA

TABLA 4.2 . VECTORES UNITARIOS NORMALES A LOS PLANOS DE MEDICION DE ESFUERZOS EN LA CORTINA

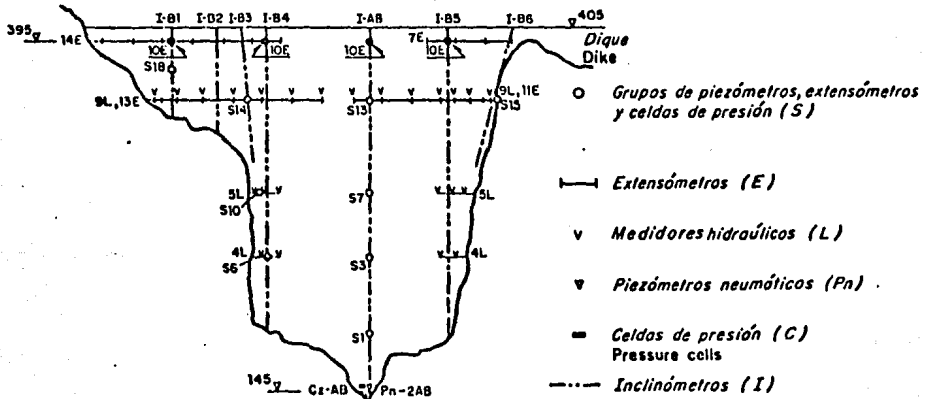




a) Vista en planta

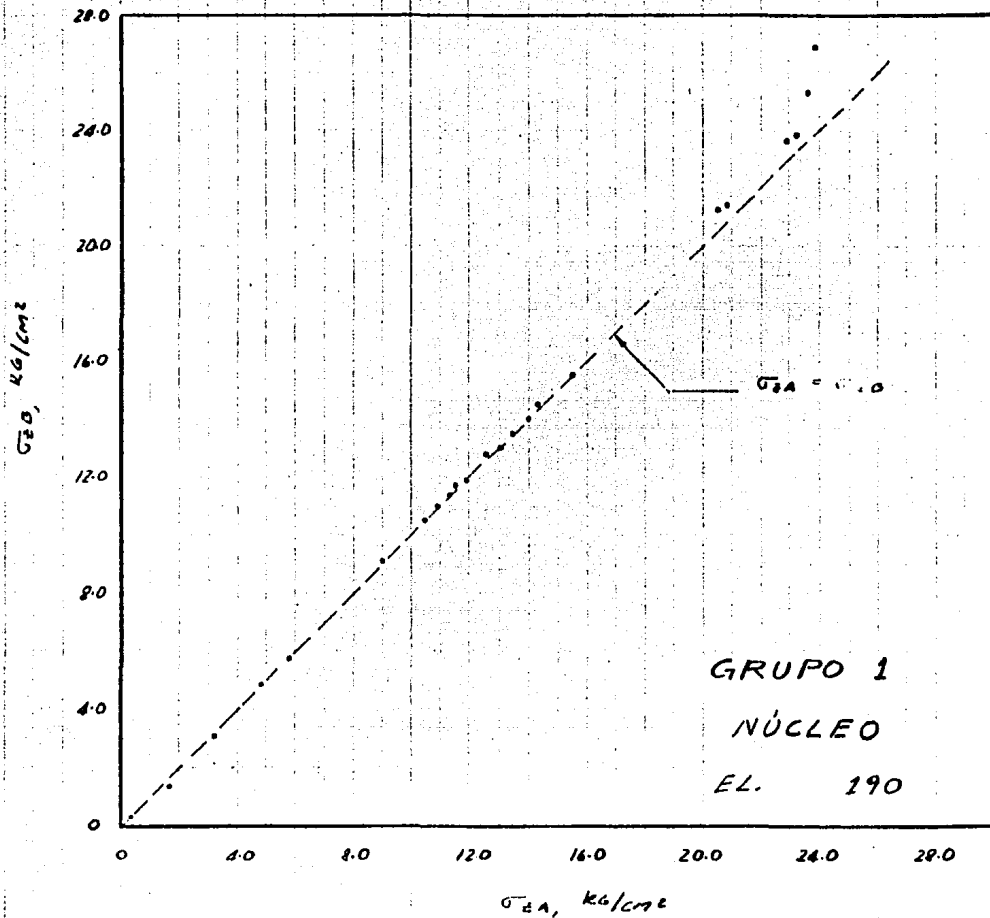


b) Sección longitudinal máxima



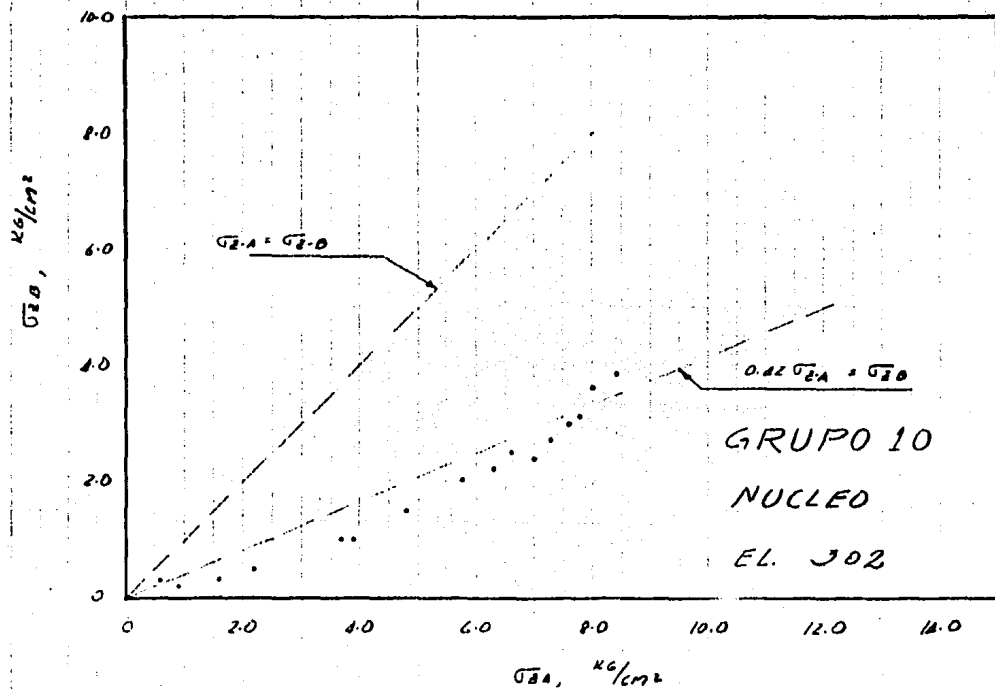
c) Sección transversal a lo largo del eje de la presa

FIGURA 4.1 . LOCALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PRESA CHICOASEN REP( 9 )



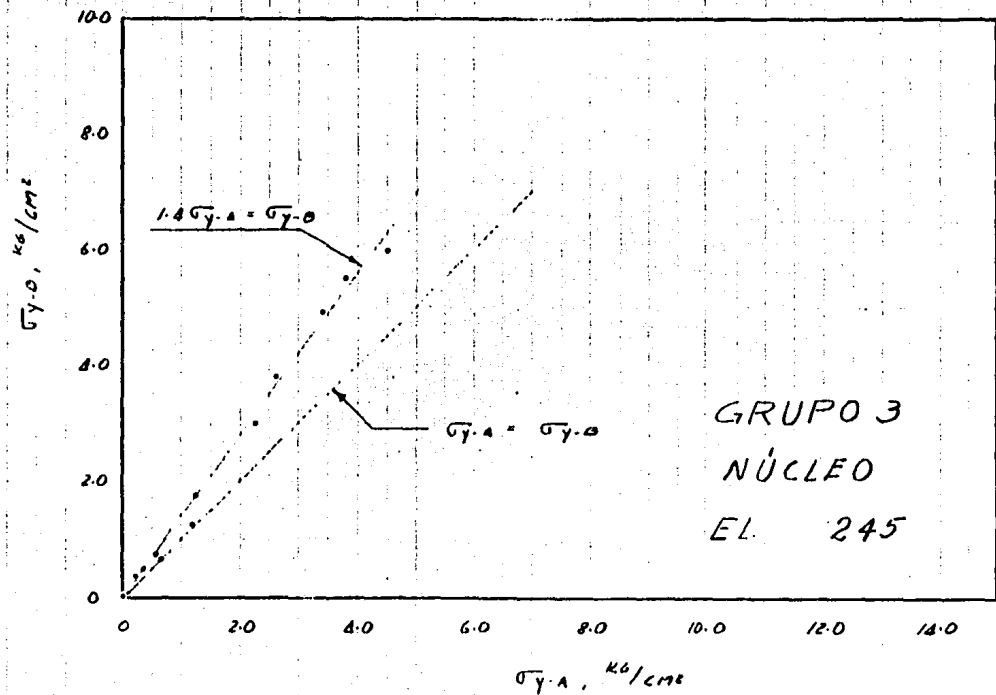
COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

FIGURA 4.2



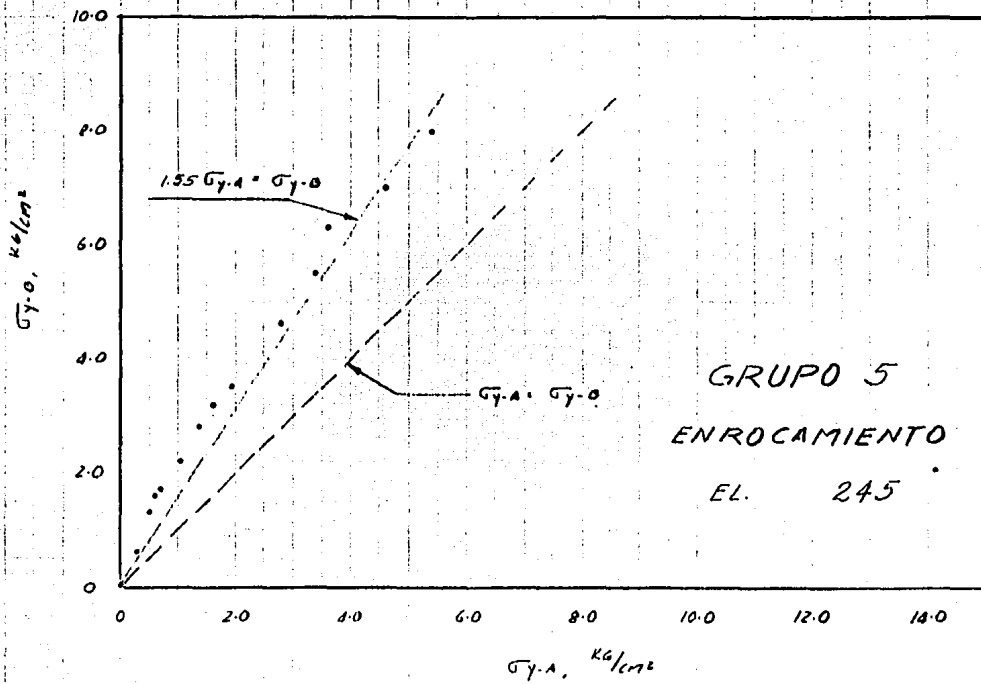
COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

FIGURA 4.3



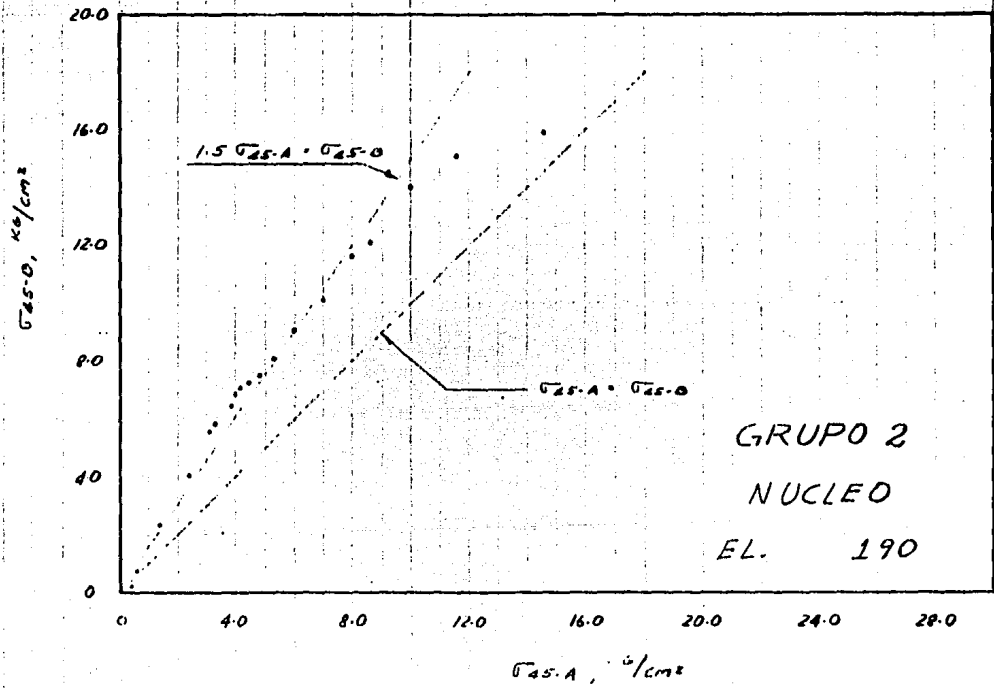
COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

FIGURA 4.4

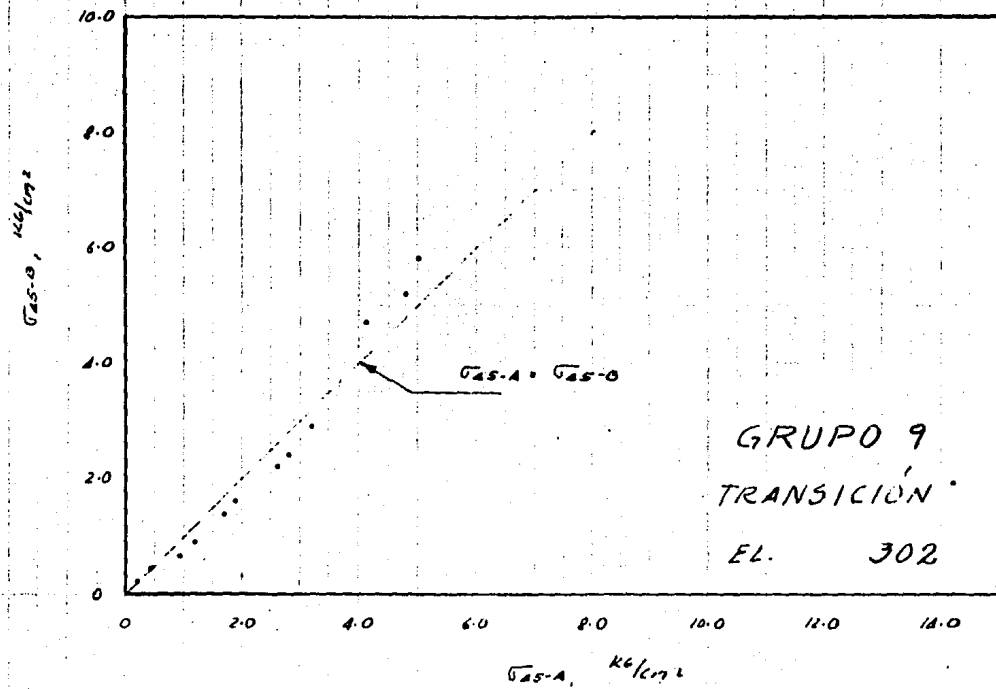


COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

FIGURA 4-5

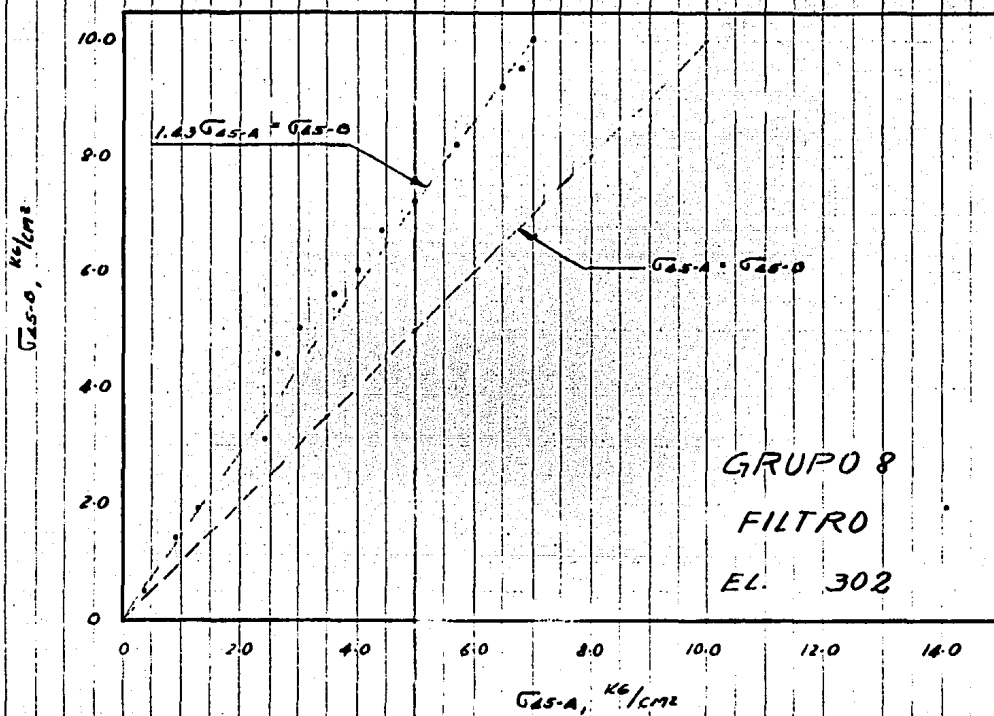


COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS



COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

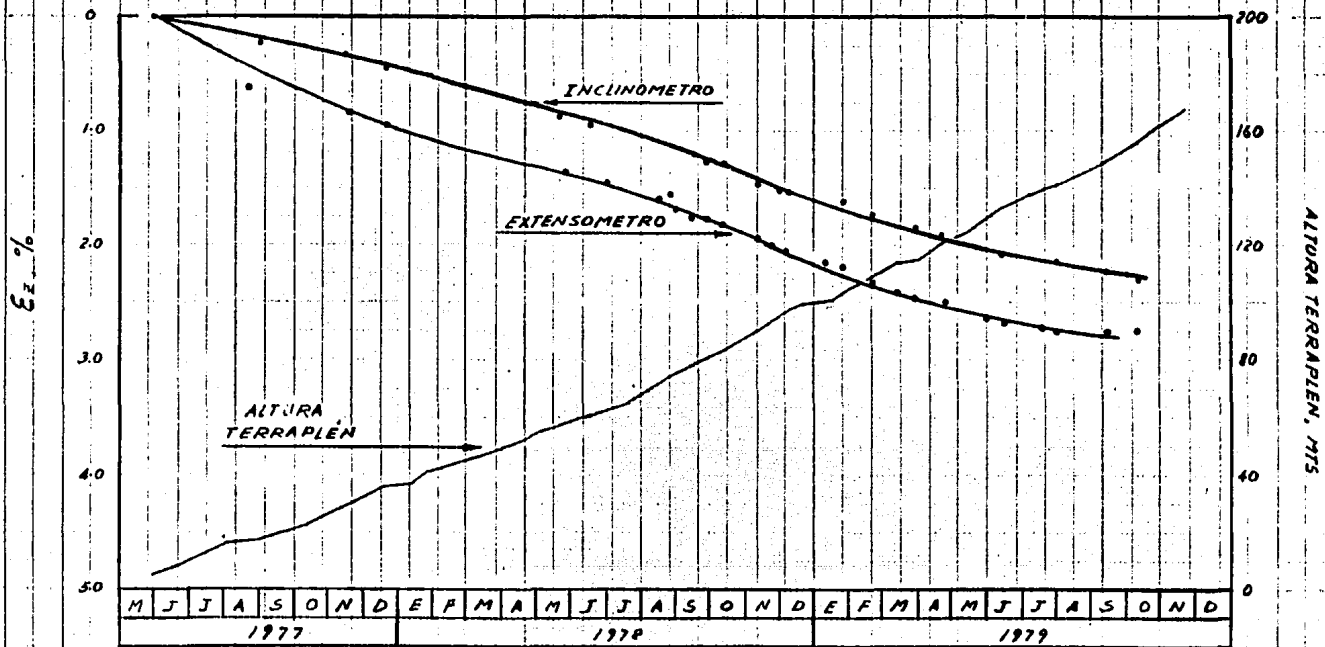
FIGURA 4.7



COMPARACION DE LECTURAS DE CELDAS DE ESFUERZOS

FIGURA 4.8



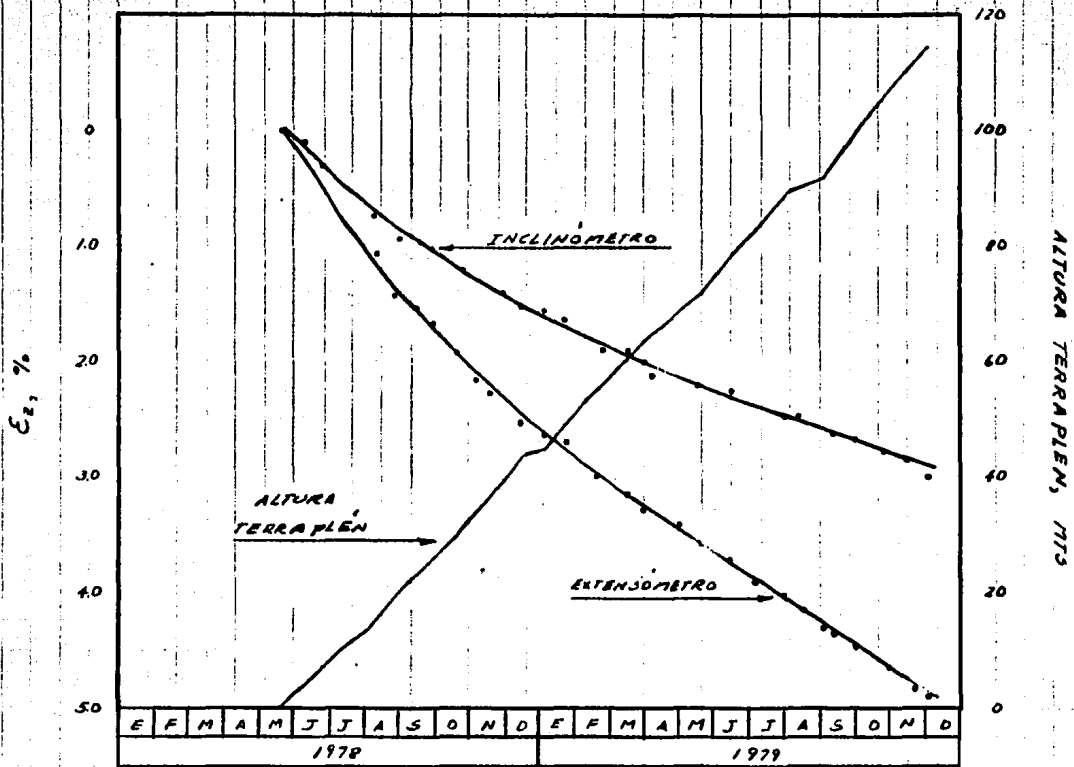


GRUPO 2

NUCLEO

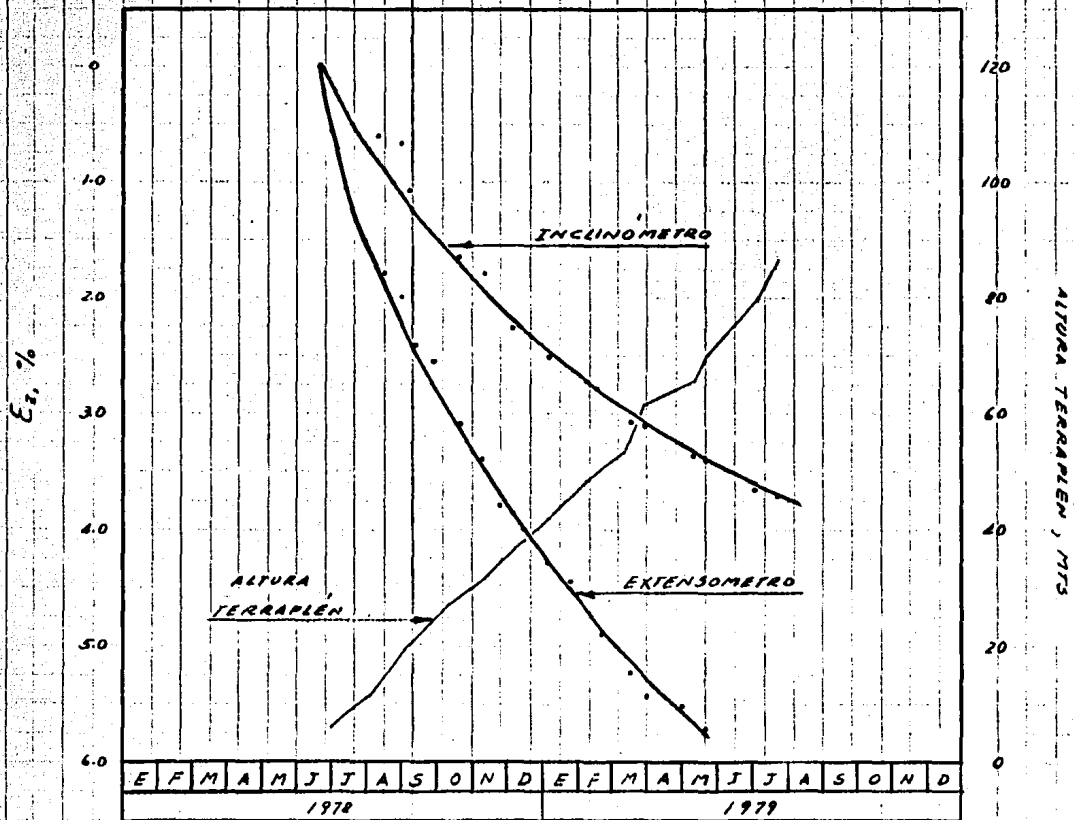
EL. 190

FIGURA 4.9



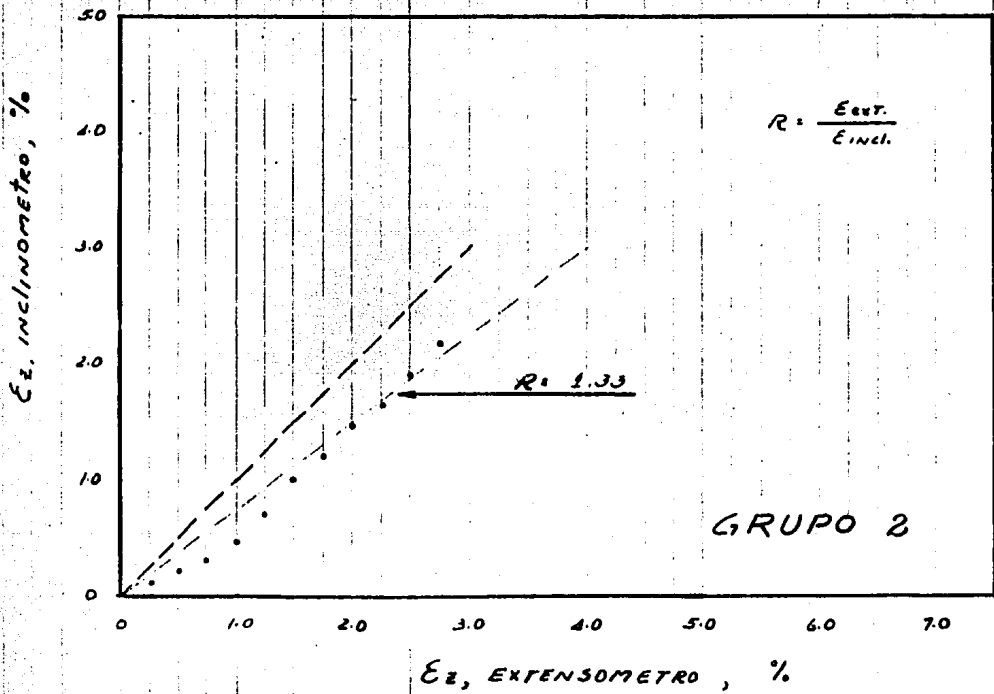
GRUPO 3  
 NUCLEO  
 EL. 245

FIGURA 4-10

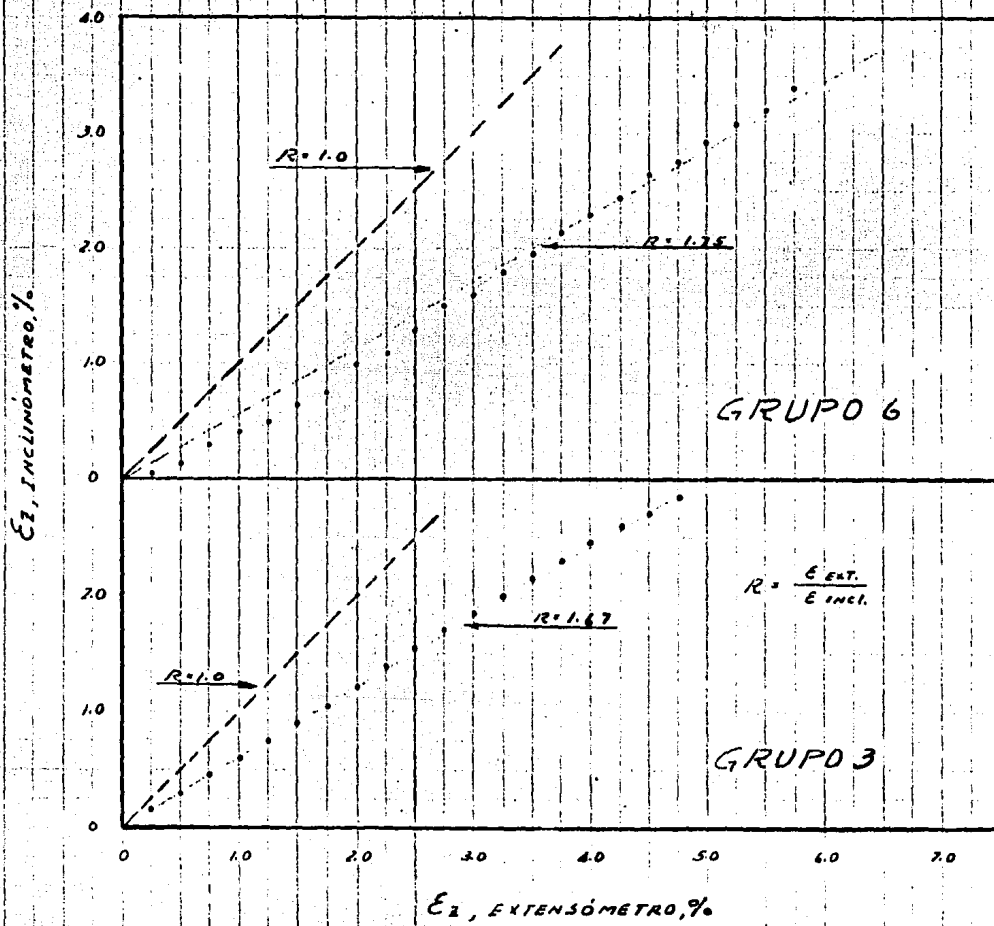


GRUPO 6  
 NUCLEO  
 EL. 245

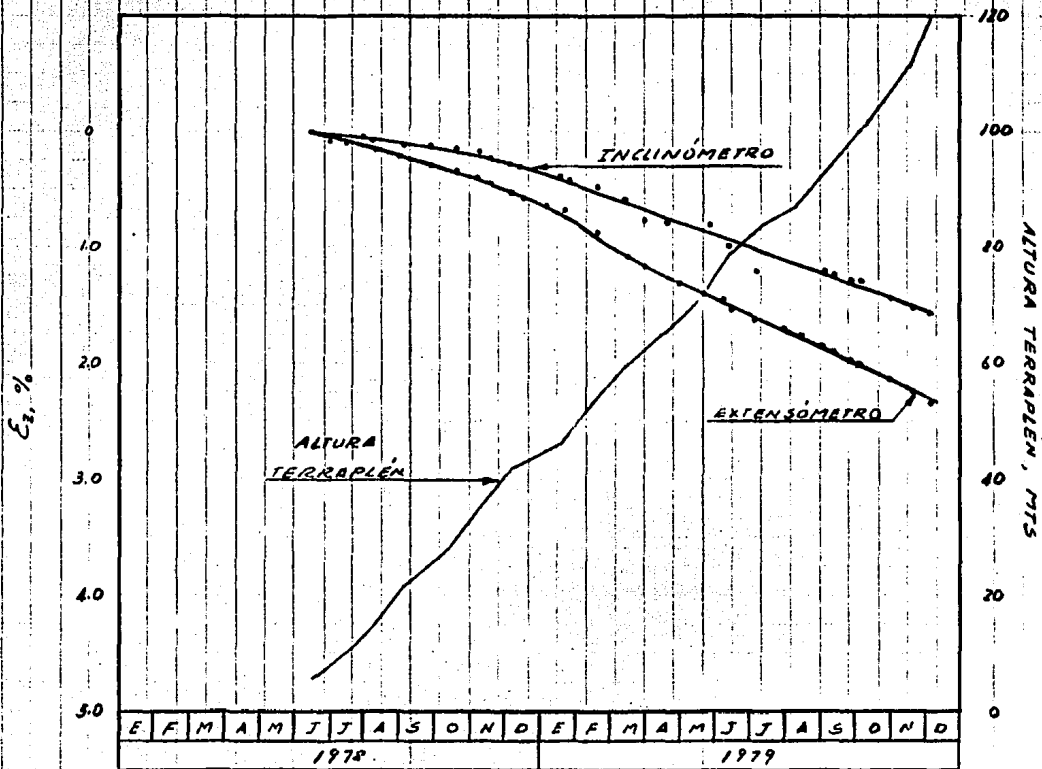
FIGURA 4.11



COMPARACION DE DEFORMACIONES UNITARIAS VERTICALES

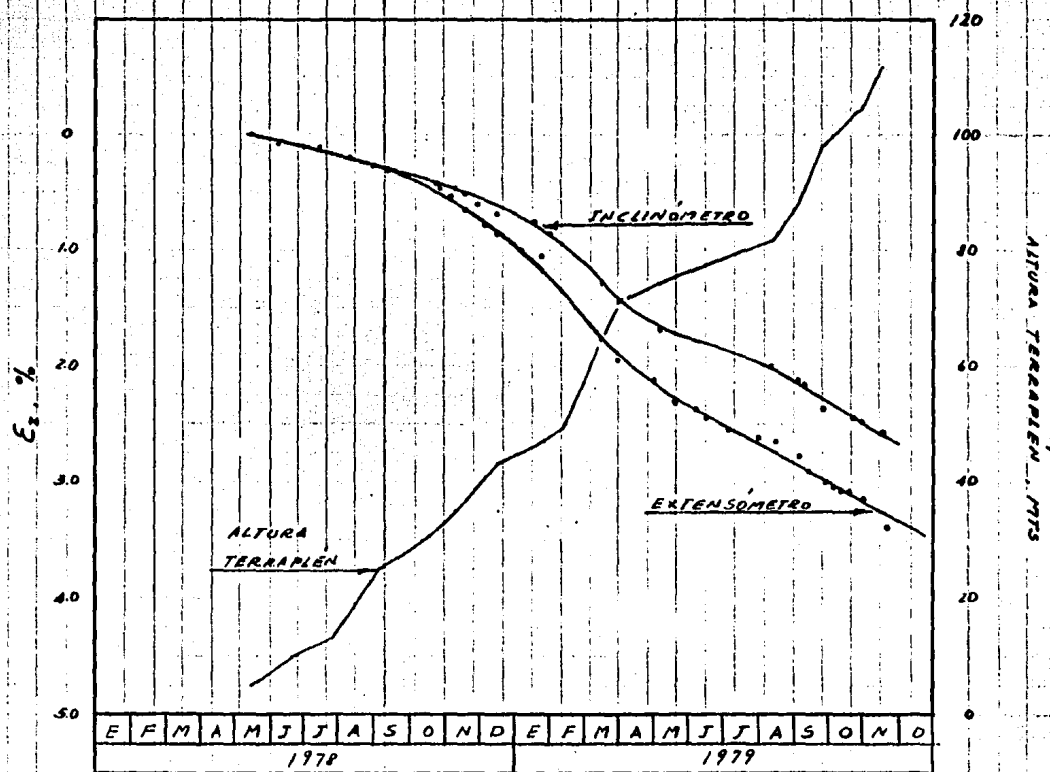


COMPARACION DE DEFORMACIONES UNITARIAS VERTICALES



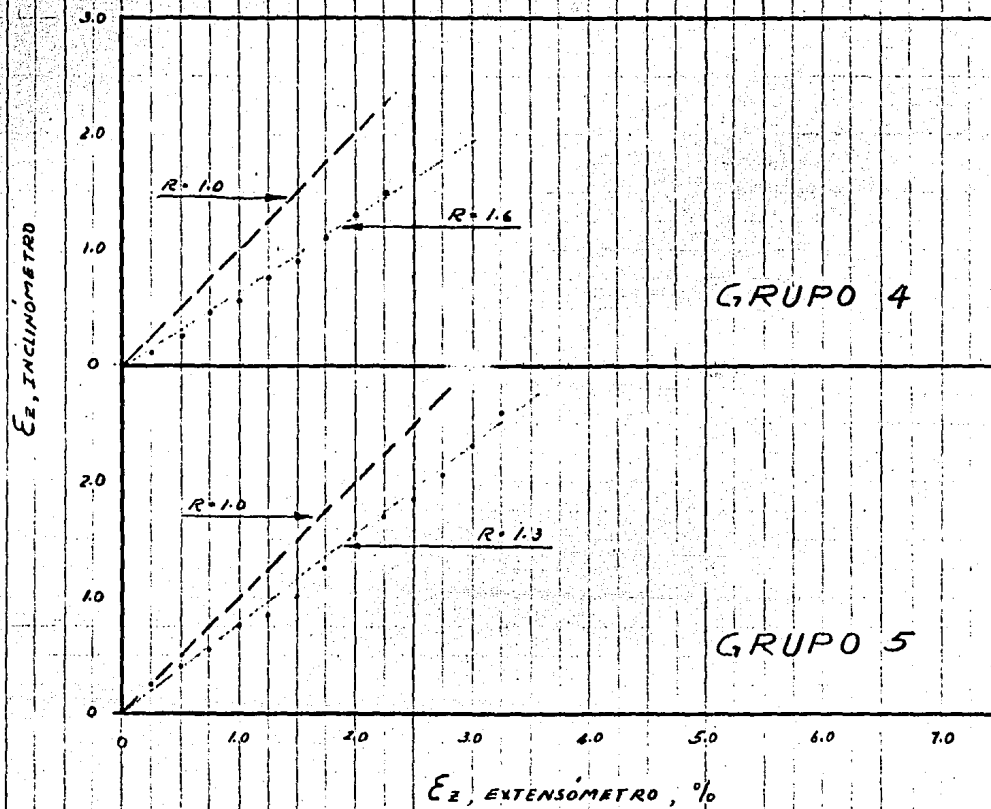
GRUPO 4  
 FILTRO  
 EL. 245

FIGURA 4.14



GRUPO 5  
 ENROCAMIENTO  
 EL. 245

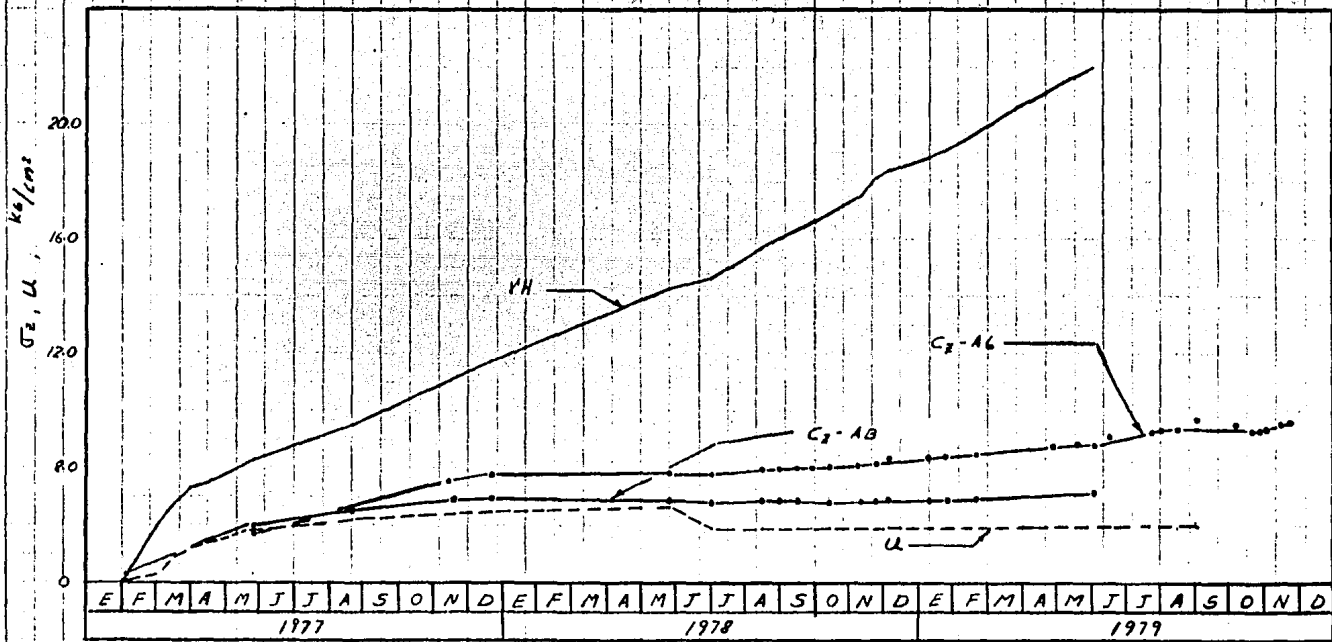
FIGURA 4.15



COMPARACION DE DEFORMACIONES UNITARIAS VERTICALES

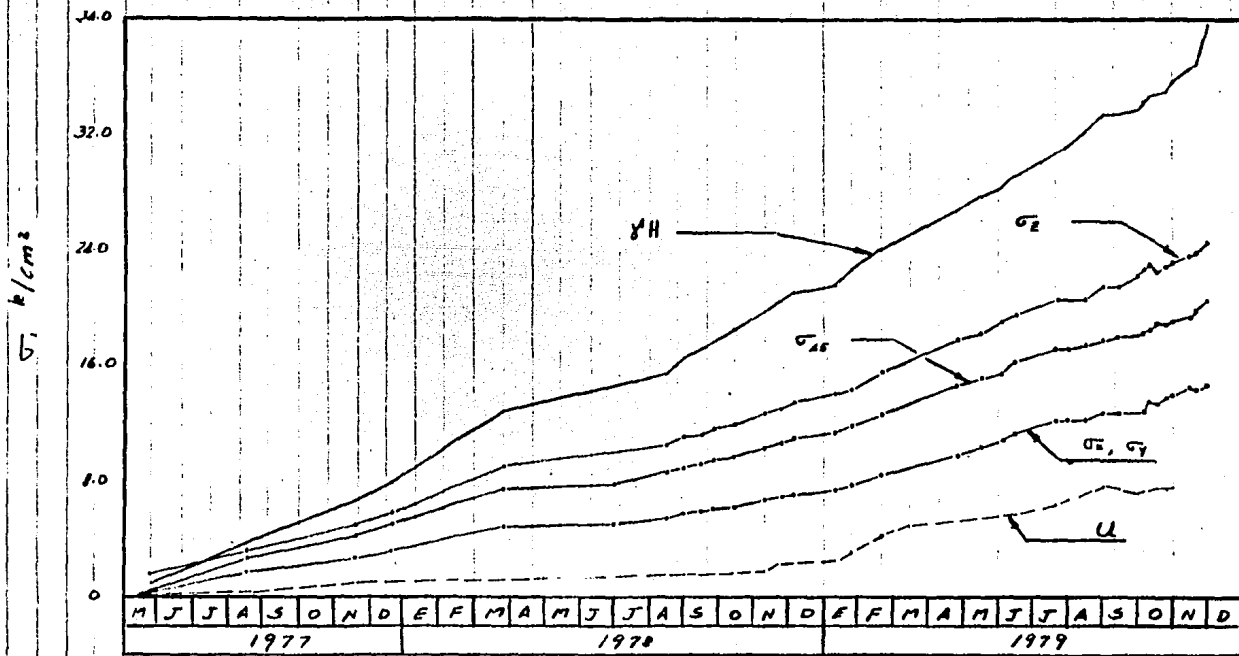
FIGURA 4.16





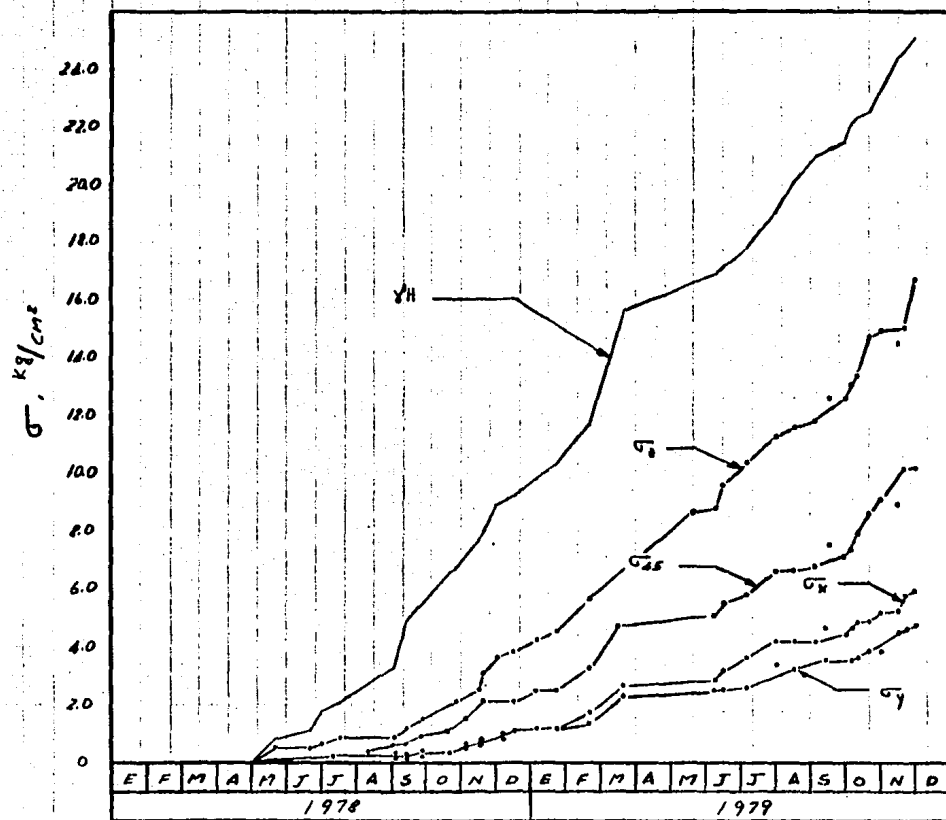
NUCLEO  
EL. 150

FIGURA 4.17



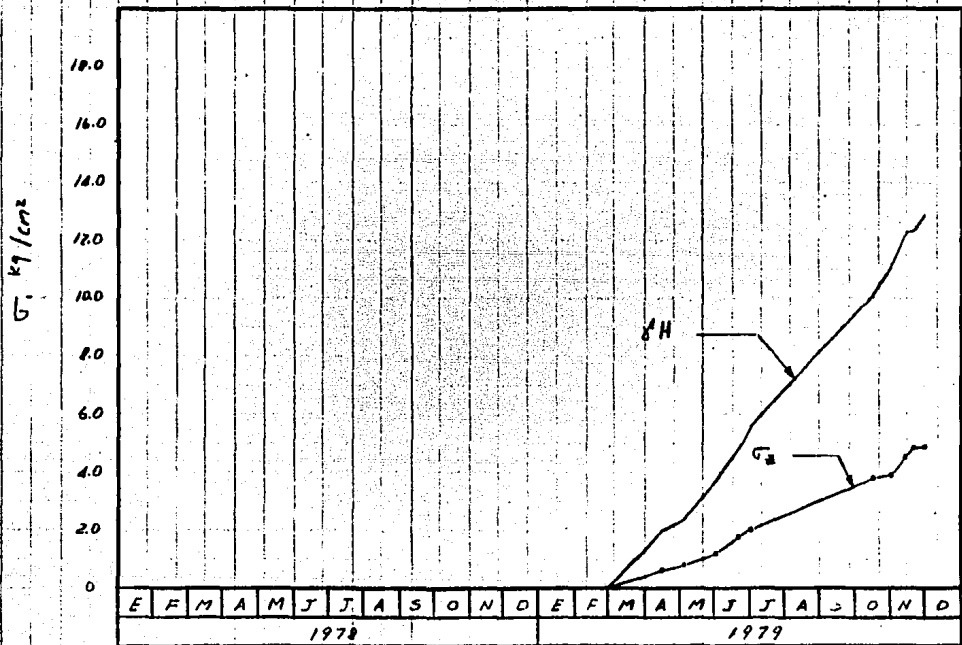
GRUPO 1  
 NUCLEO  
 EL. 190

FIGURA 4.18



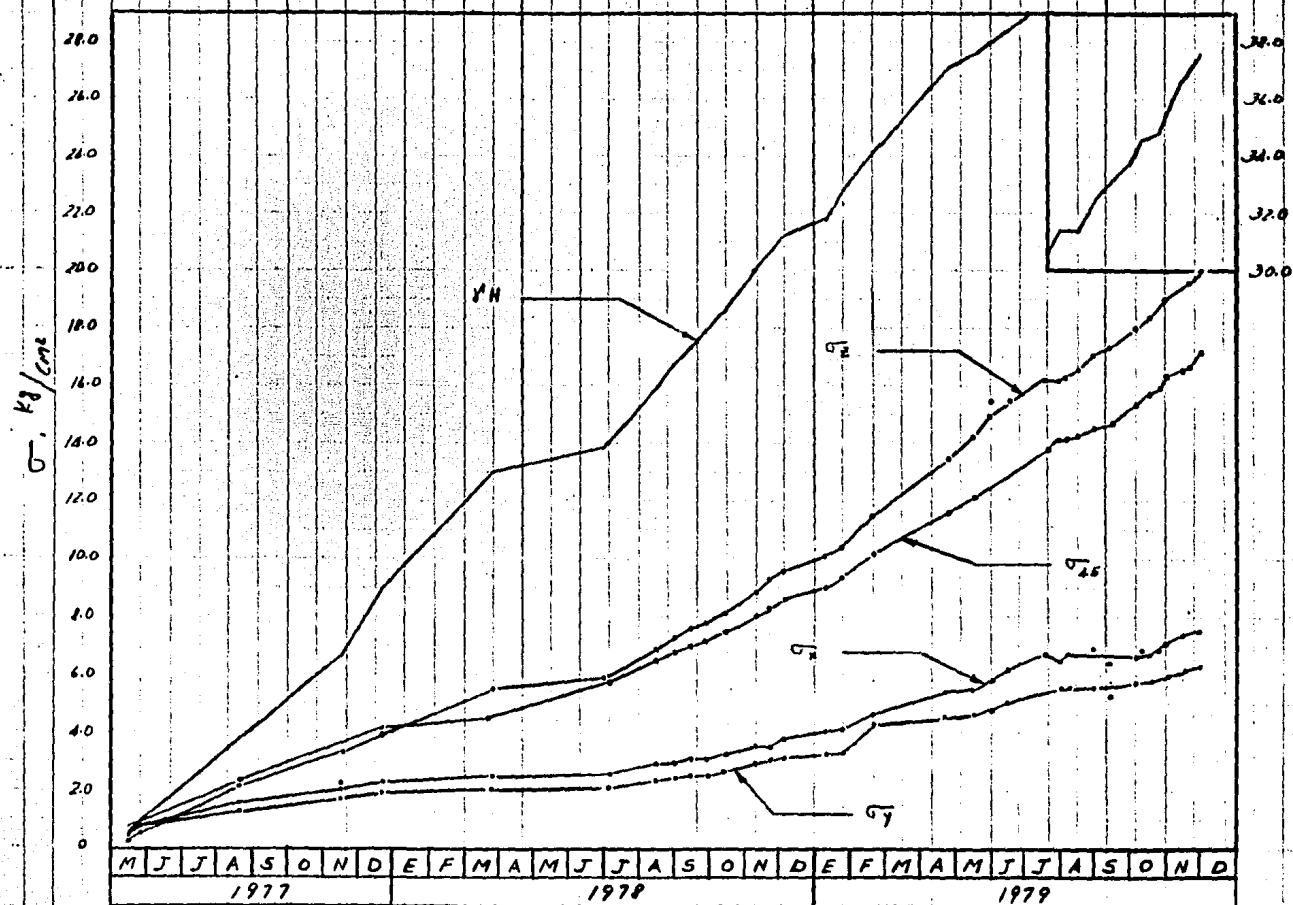
GRUPO 3  
 NUCLEO  
 EL. 245

FIGURA 4.19

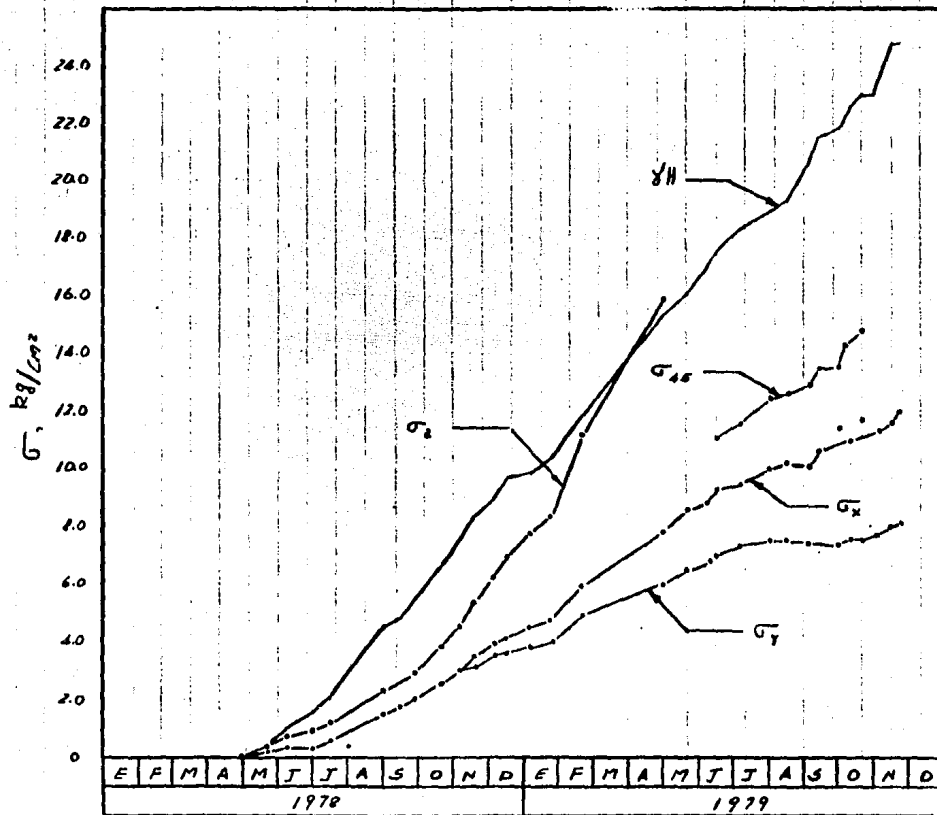


GRUPO 7  
 NUCLEO  
 EL. 302

FIGURA 4-20



GRUPO 2  
 NUCLEO  
 EL. 190

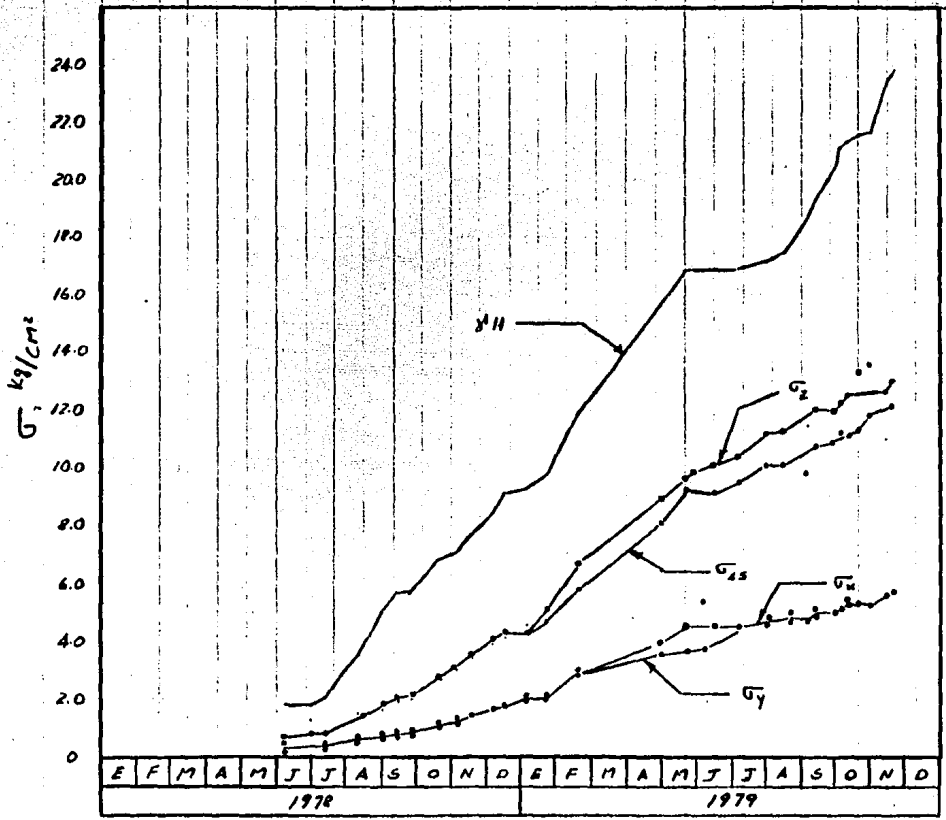


GRUPO 4

FILTRO

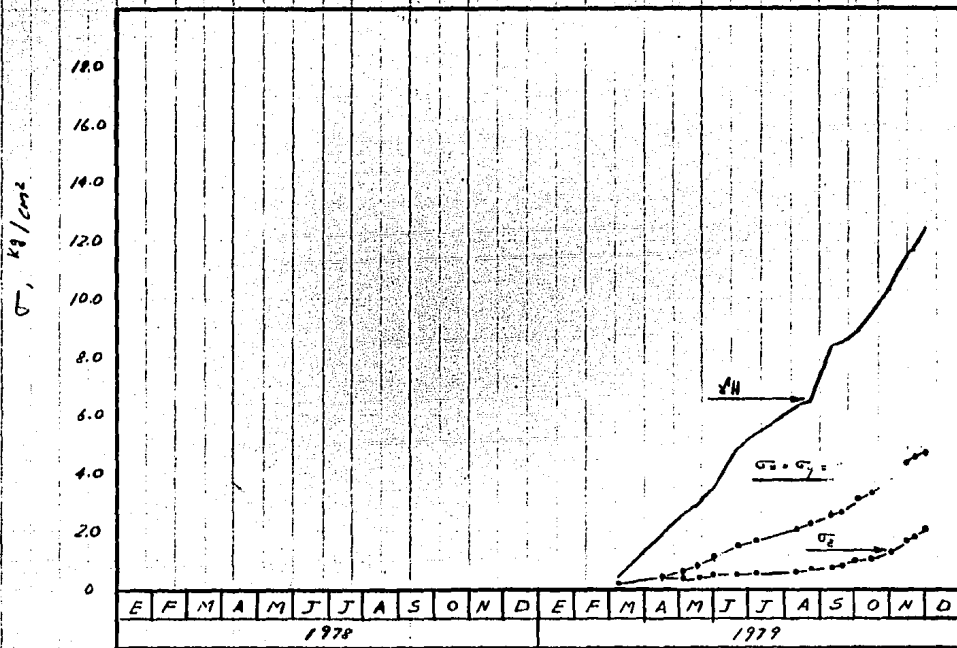
EL. 245

FIGURA 432



GRUPO 5  
 ENROCAMIENTO  
 EL. 245

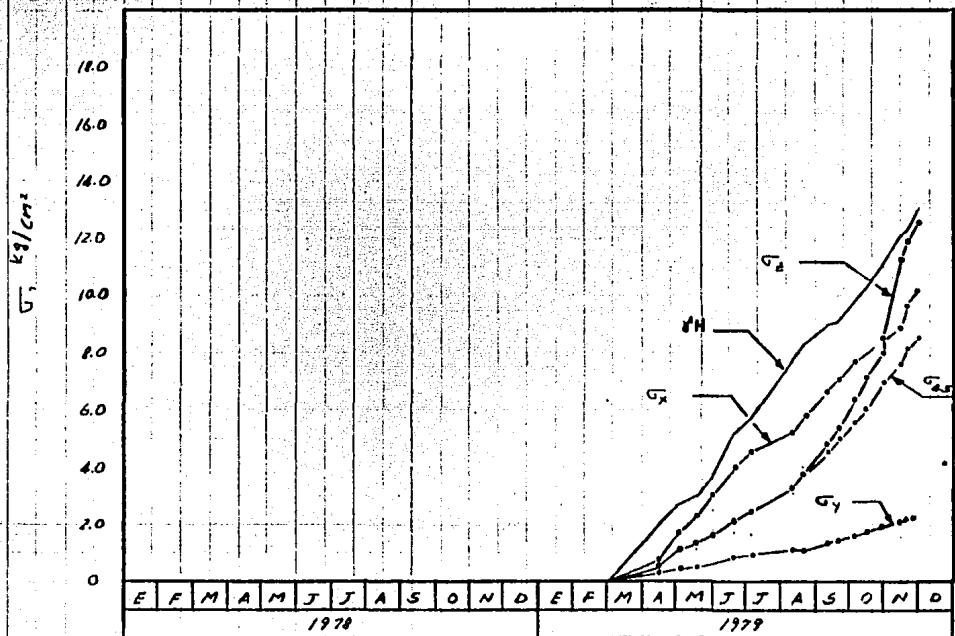
FIGURA 4.23



GRUPO 9  
 ENROCAMIENTO  
 EL. 302

FIGURA 4-24



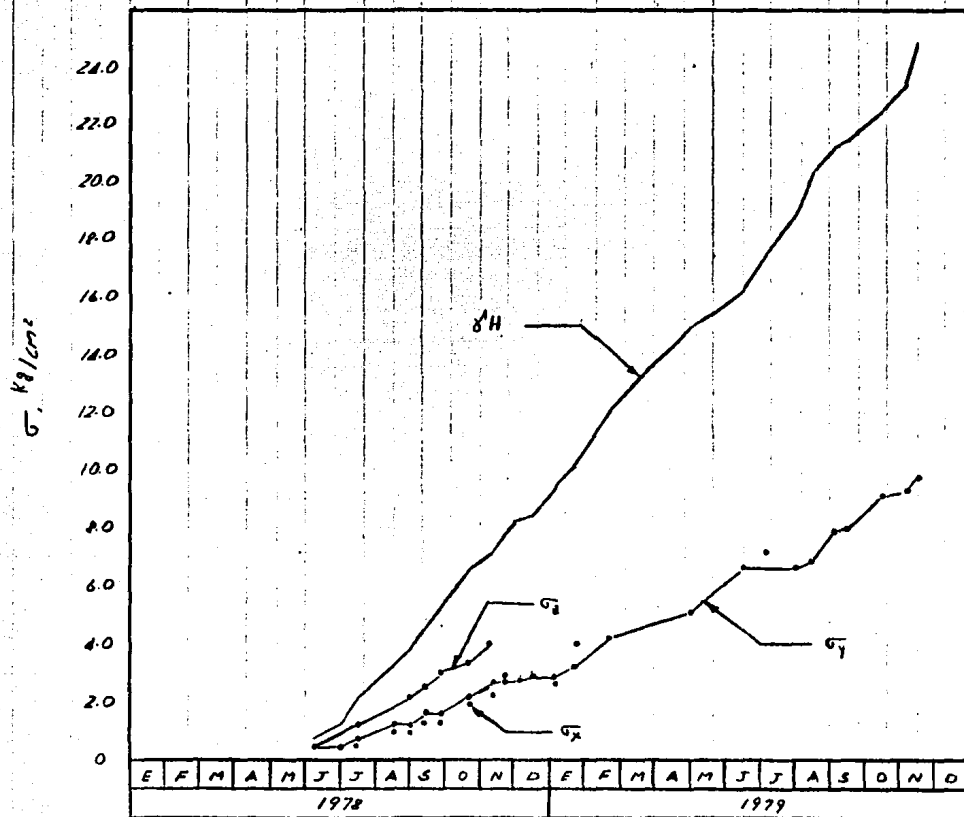


GRUPO 8

FILTRO

El. 302

FIGURA 4.25

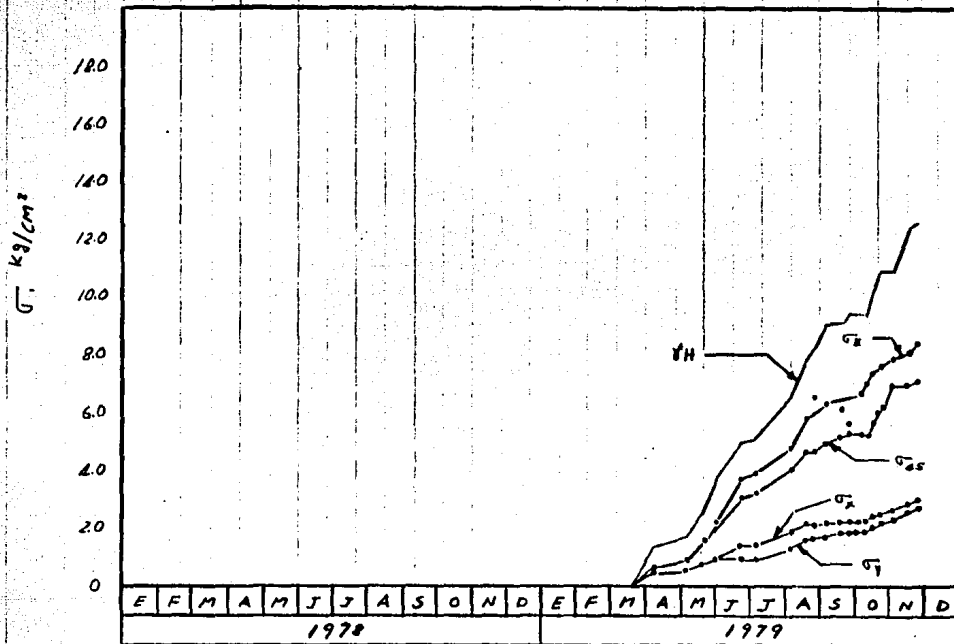


GRUPO 6

NUCLEO

EL. 245

FIGURA 4.26

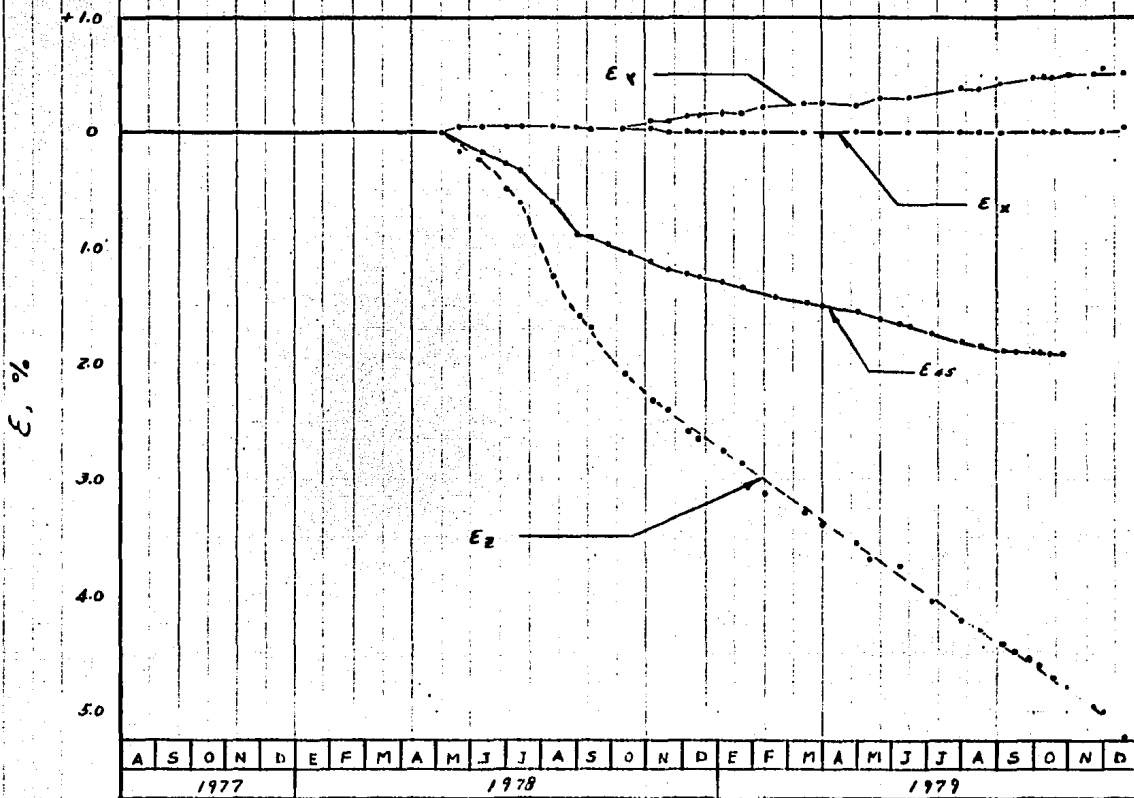


GRUPO 10

NUCLEO

EL. 302

FIGURA 4.27



GRUPO 3

NUCLEO

EL. 245

FIGURA 4.28

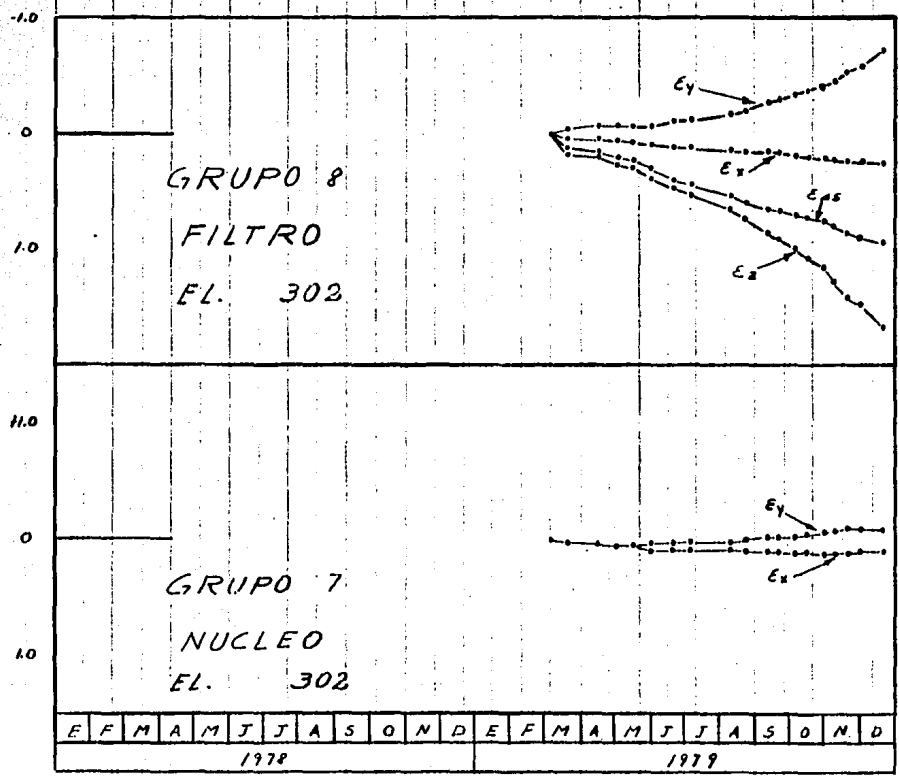
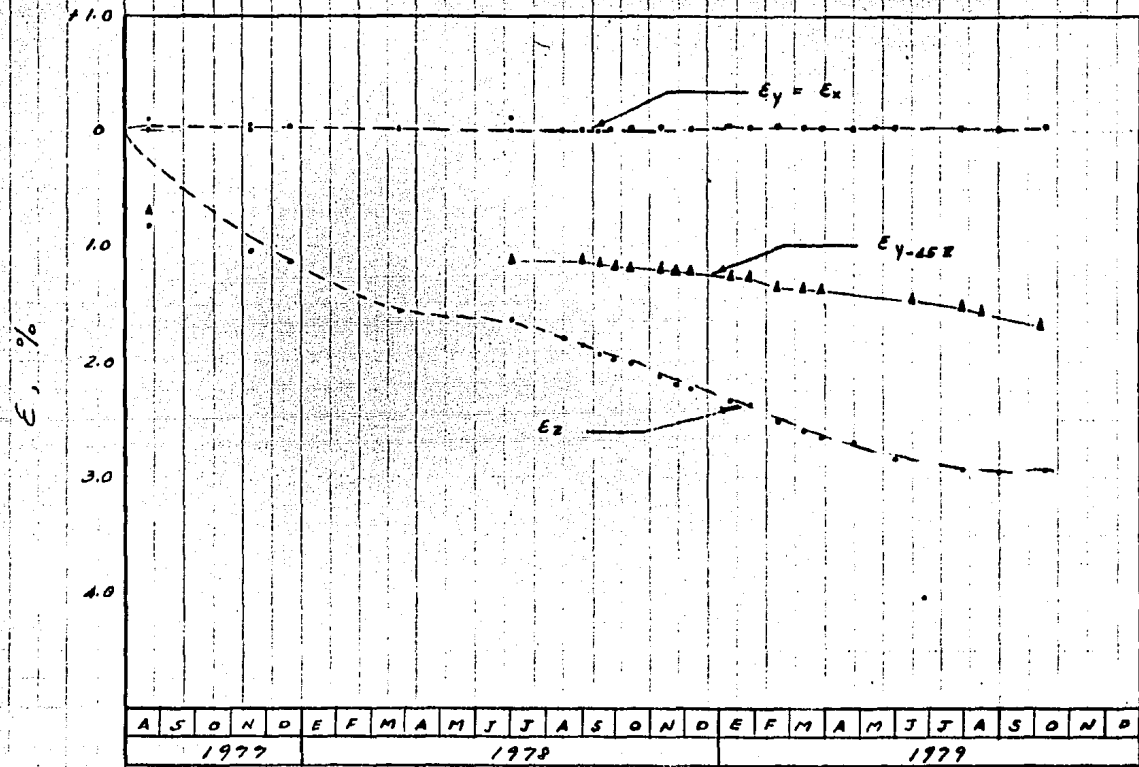
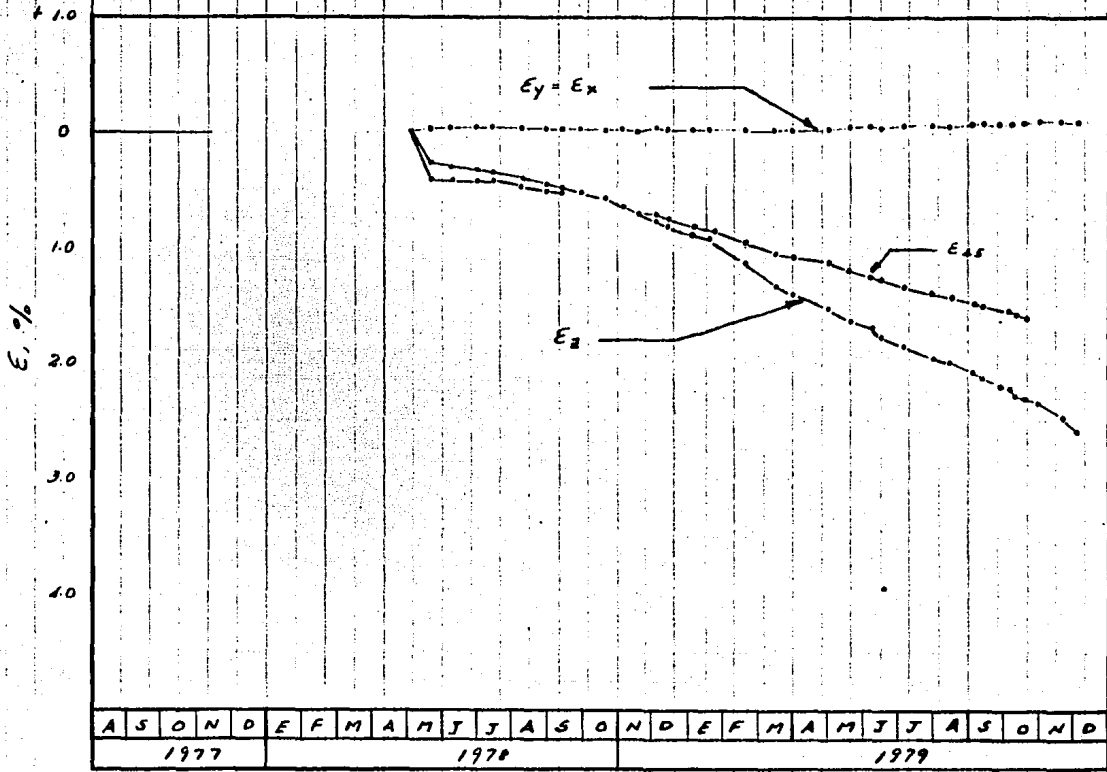


FIGURA 4.29



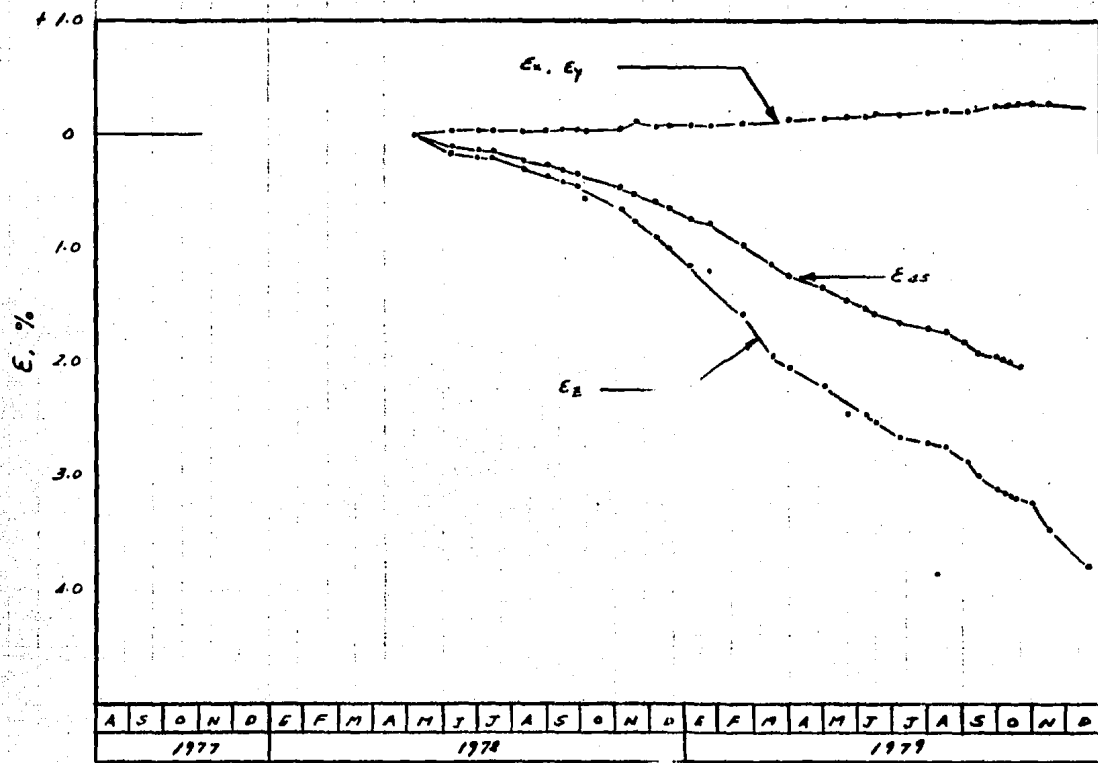
GRUPO 2  
 NUCLEO  
 EL. 190

FIGURA 4.30



GRUPO 4  
 FILTRO  
 EL. 245

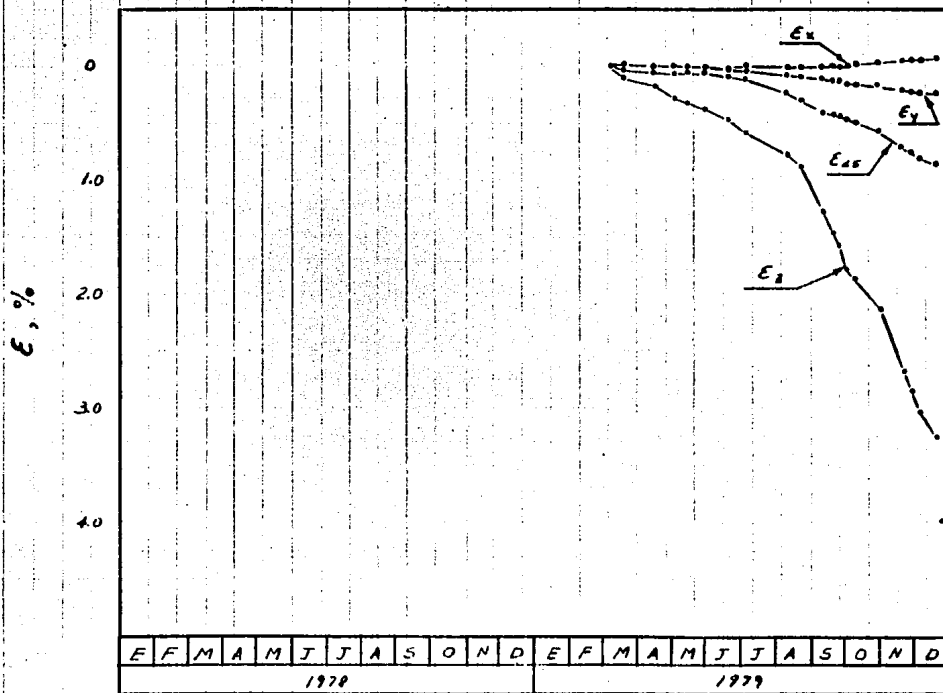
FIGURA 4.31



GRUPO 5  
 ENROCAMIENTO  
 EL. 245

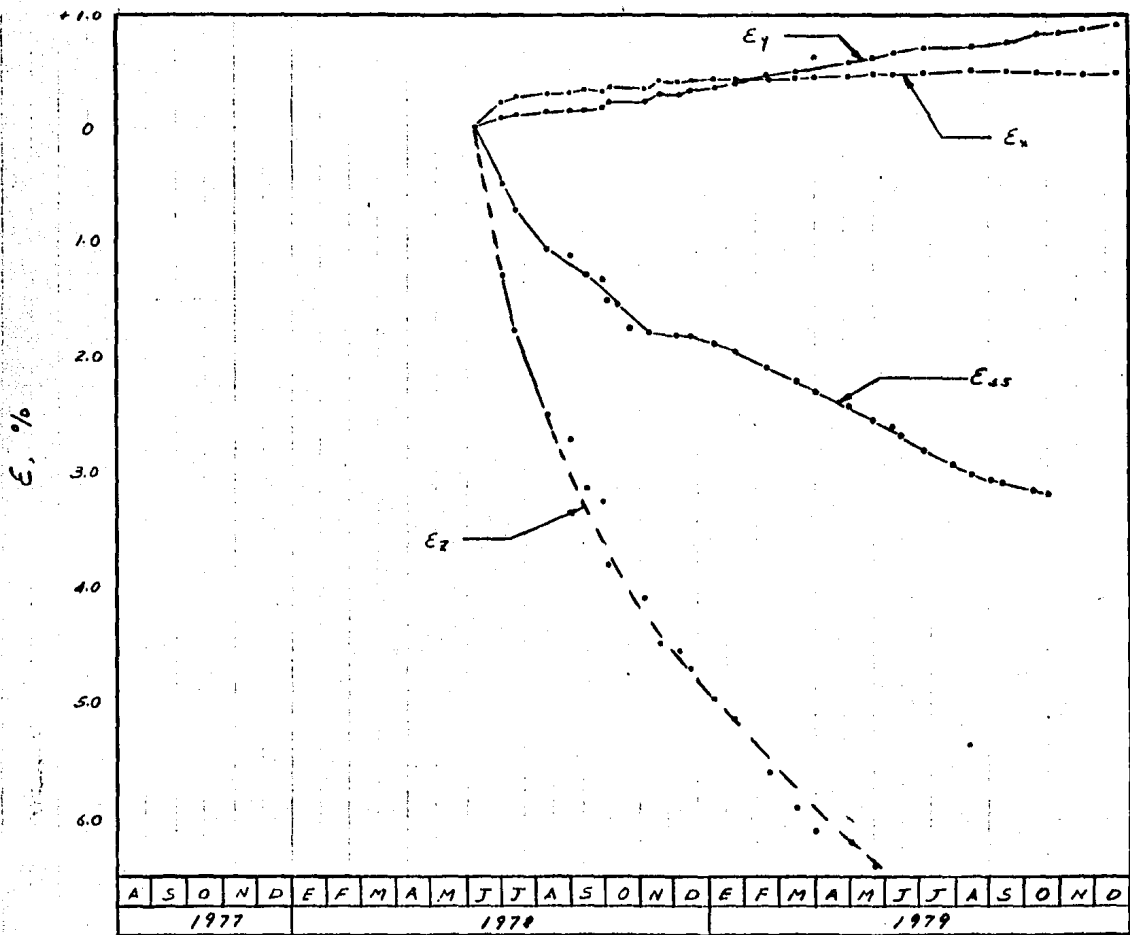
FIGURA 4.32





GRUPO 9  
 ENROCAMIENTO  
 EL. 302

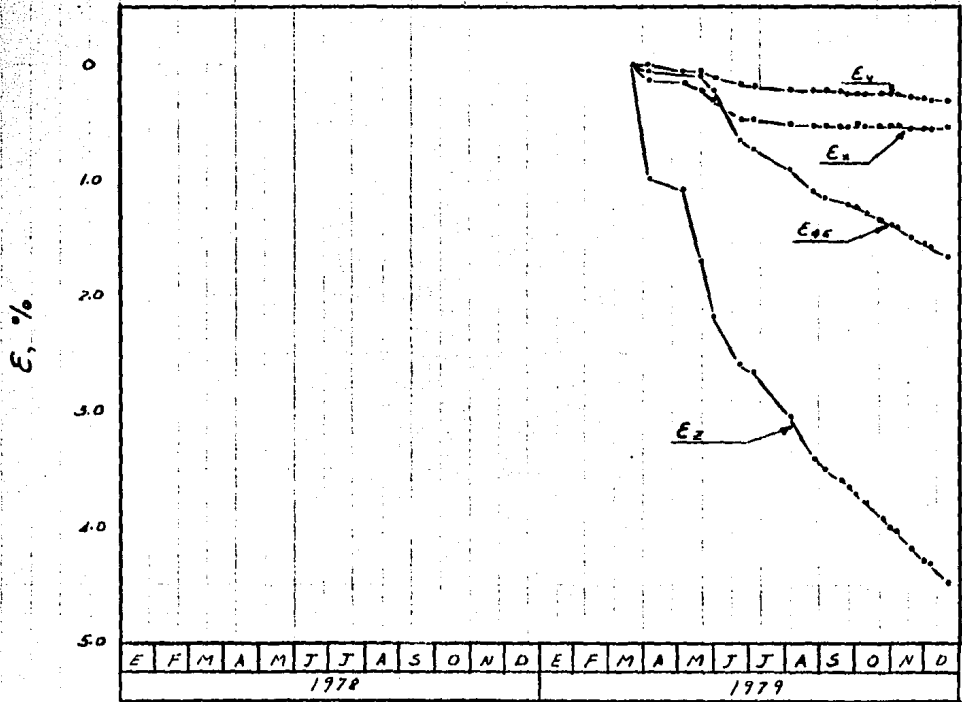
FIGURA 4.33



GRUPO 6

NUCLEO

EL. 245



GRUPO 10  
 NUCLEO  
 EL. 302

FIGURA 4.35

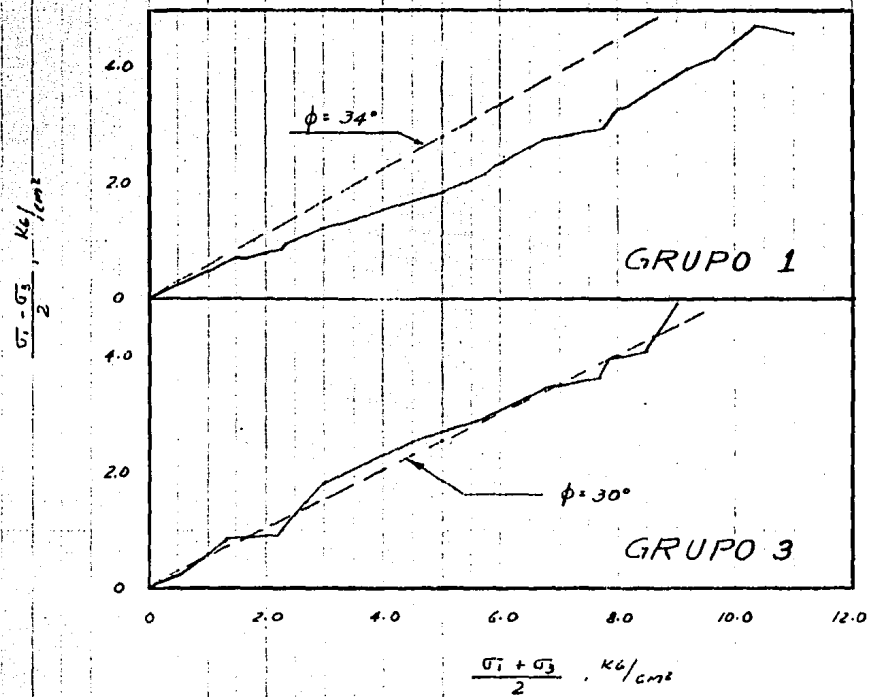


FIGURA 4.36

$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ , Kg/cm<sup>2</sup>

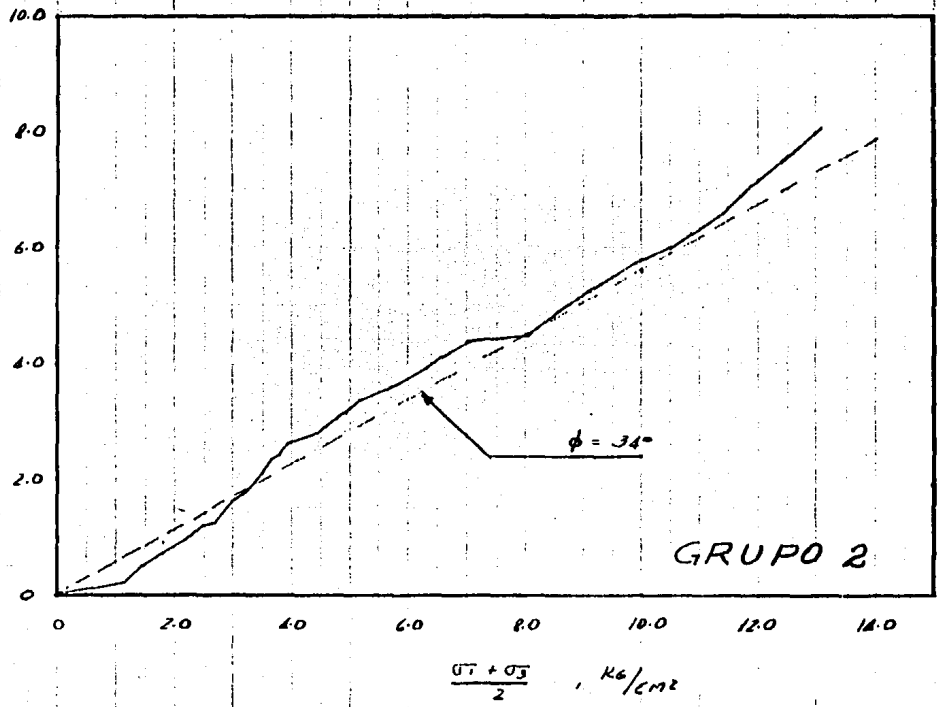


FIGURA 4.37

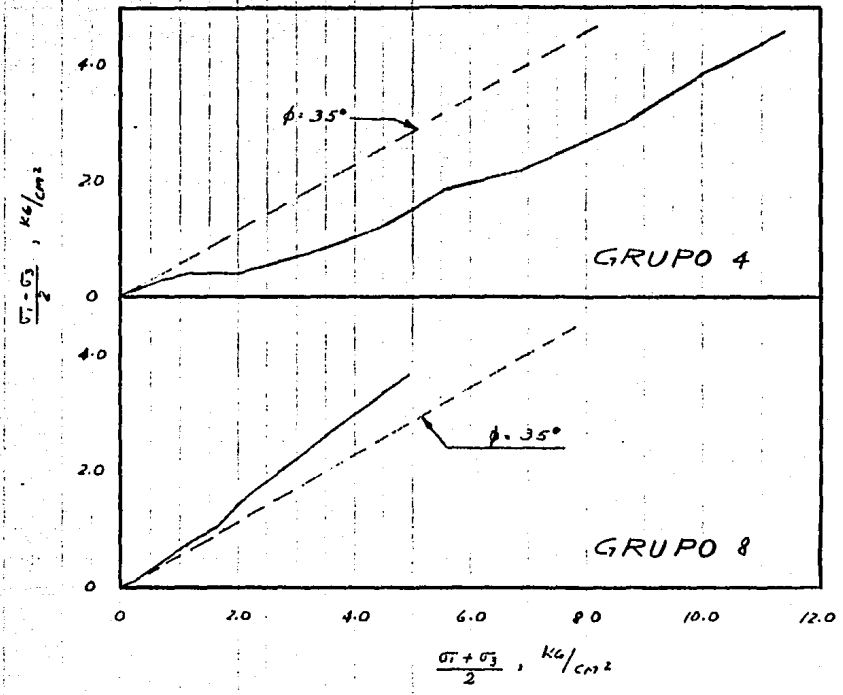


FIGURA 4.38

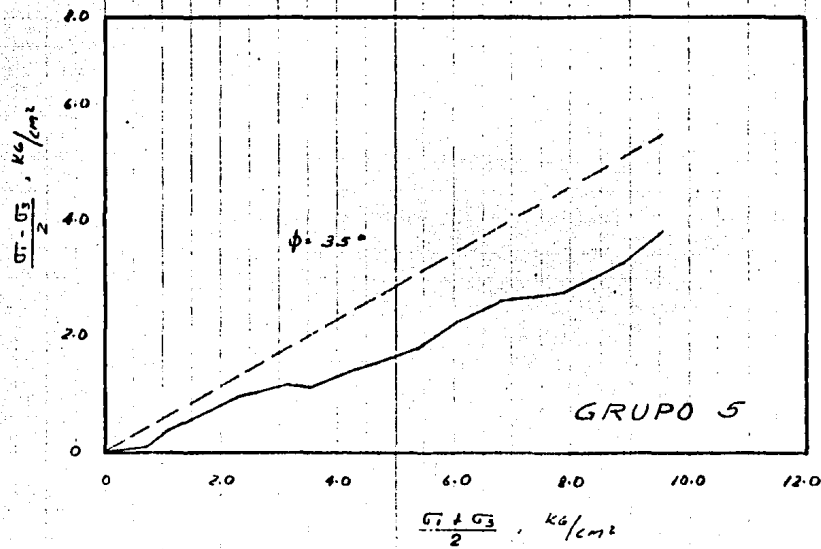
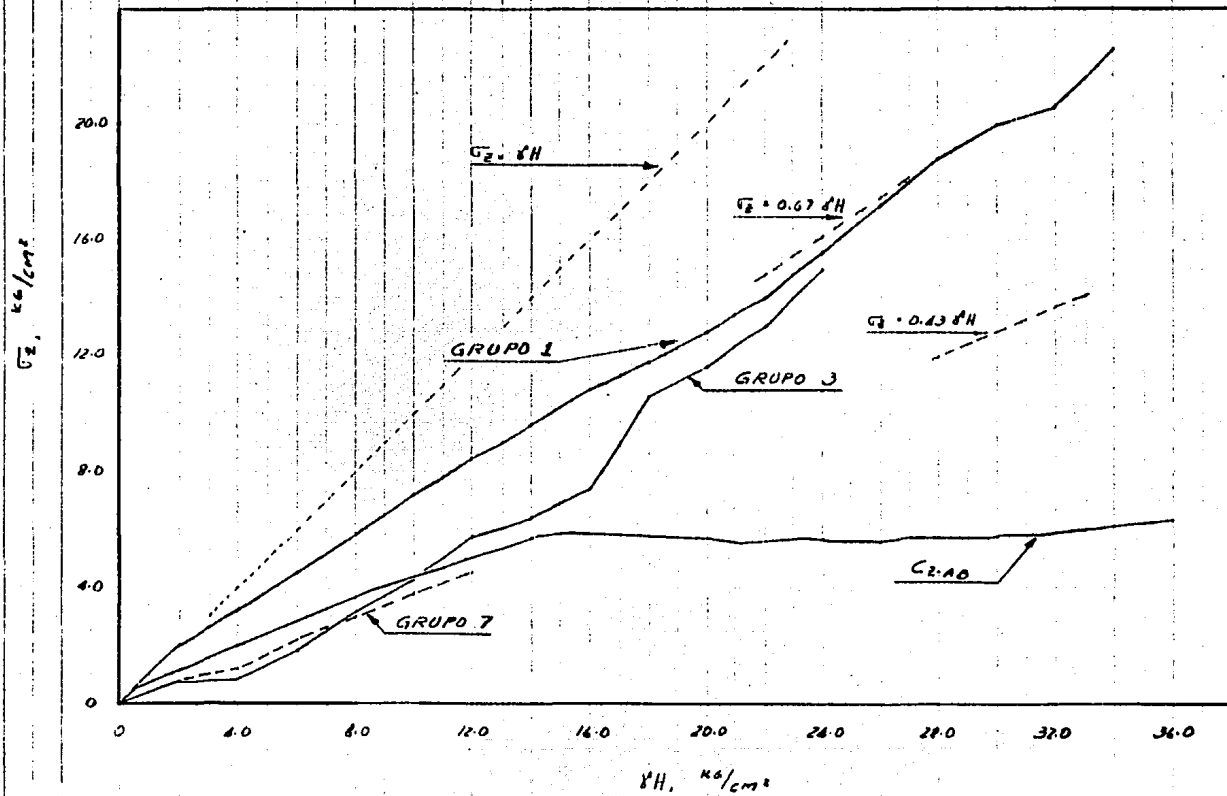


FIGURA 4.39



VARIACION DE ESFUERZOS VERTICALES CON EL AVANCE DEL TERRAJEN

FIGURA 4.40



DIAGRAMAS DE ESFUERZOS VERTICALES EN EL EJE DEL NÚCLEO

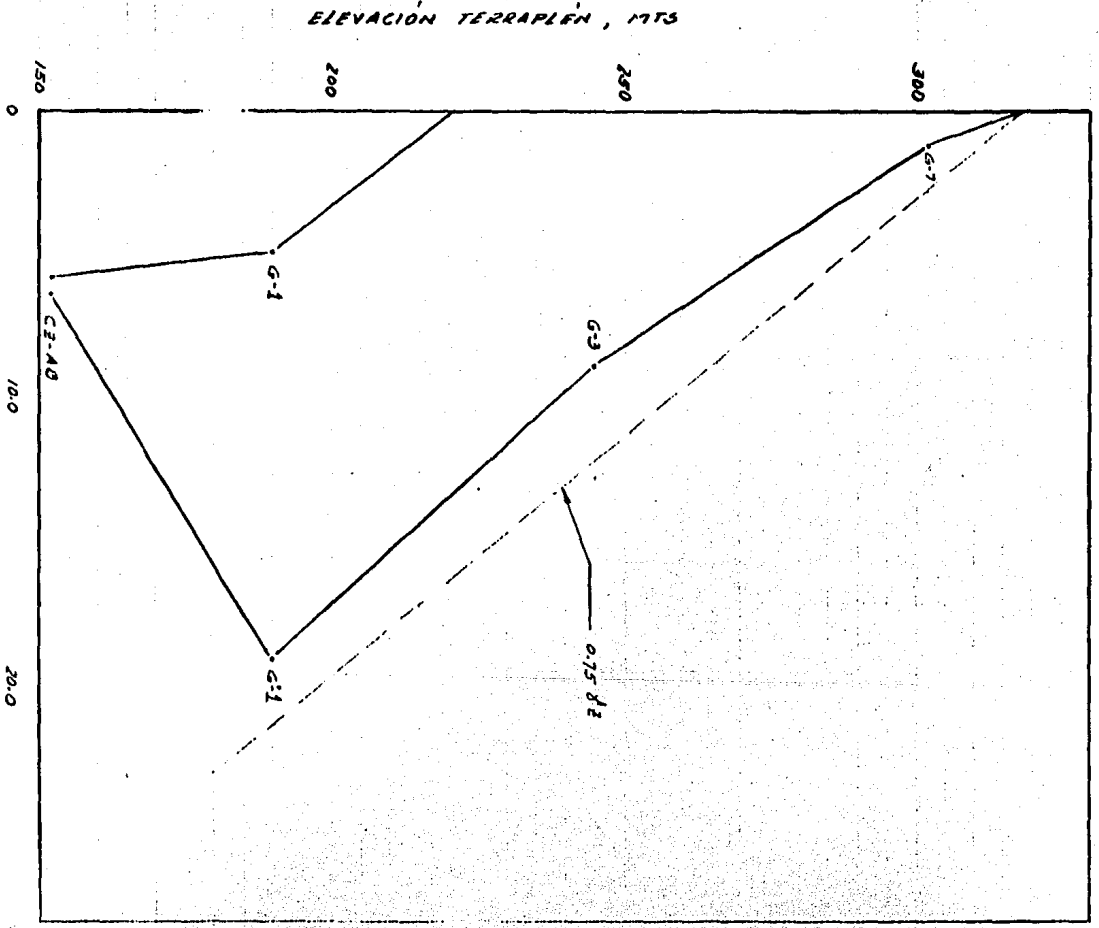
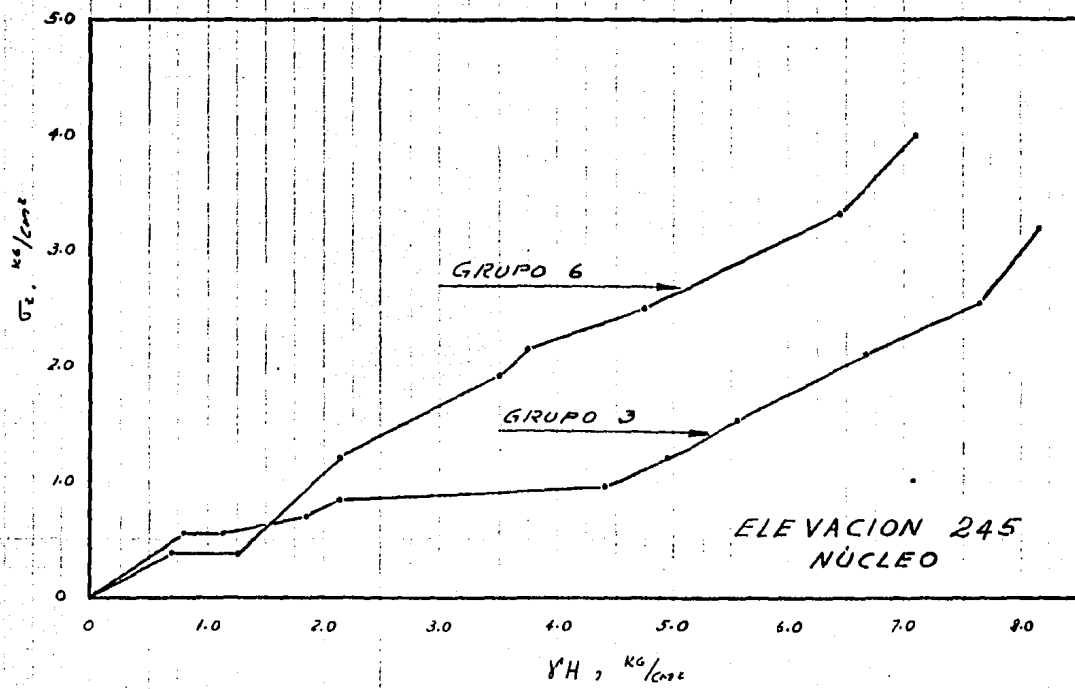
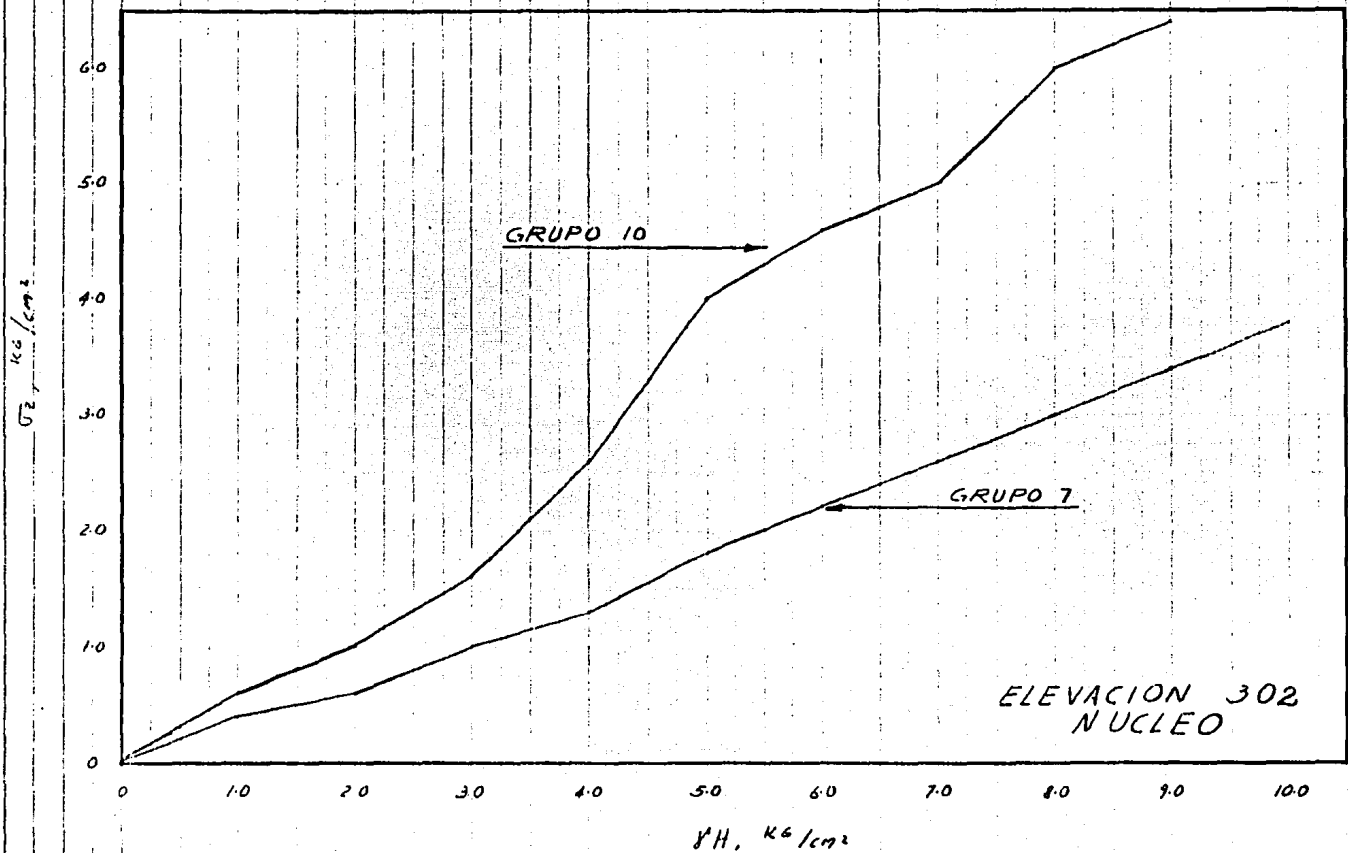


FIGURA 4.21



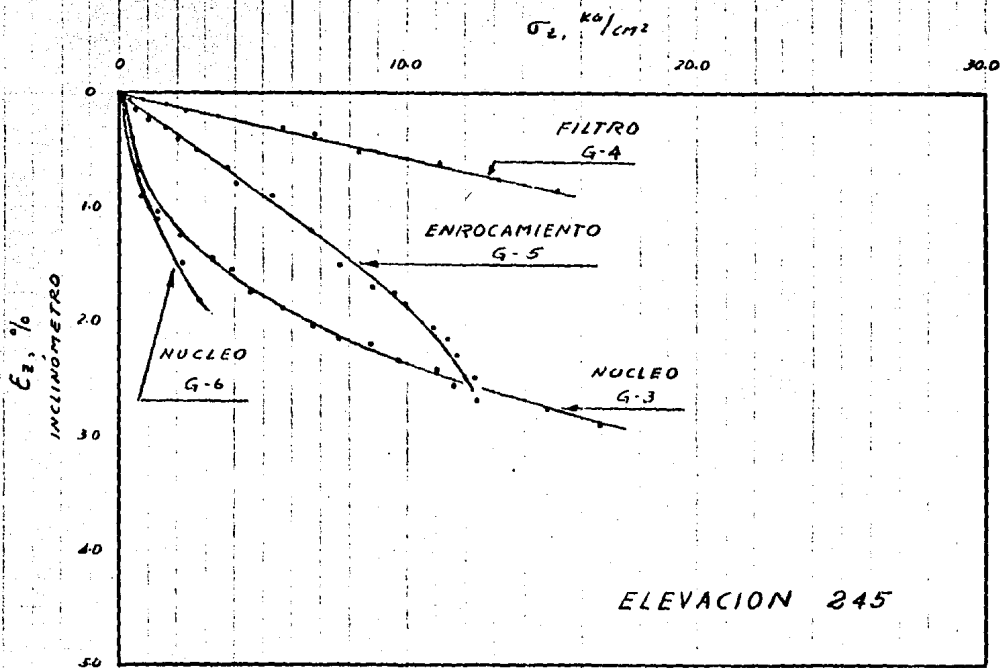
VARIACION DE ESFUERZOS VERTICALES CON EL AVANCE DEL TERRAJEN

FIGURA 4.42



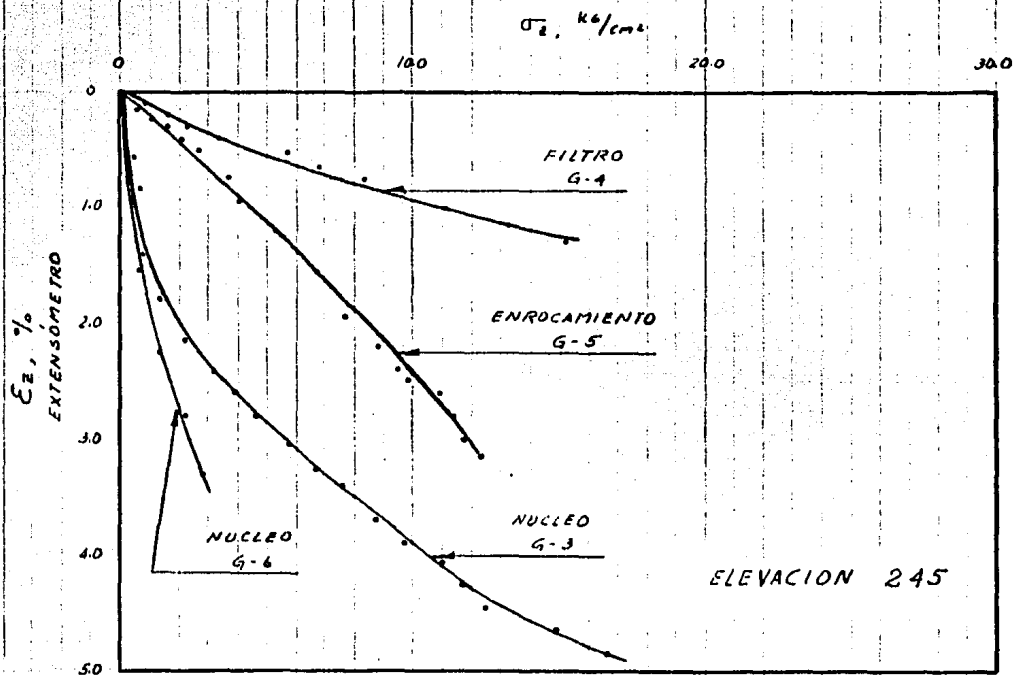
VARIACION DE ESFUERZOS VERTICALES CON EL AVANCE DEL TERRAJEN

FIGURA 4.43



RELACIONES ESFUERZO - DEFORMACION VERTI-  
CALES

FIGURA 4.44



RELACIONES ESFUERZO - DEFORMACION VERTICALES

FIGURA 4.45

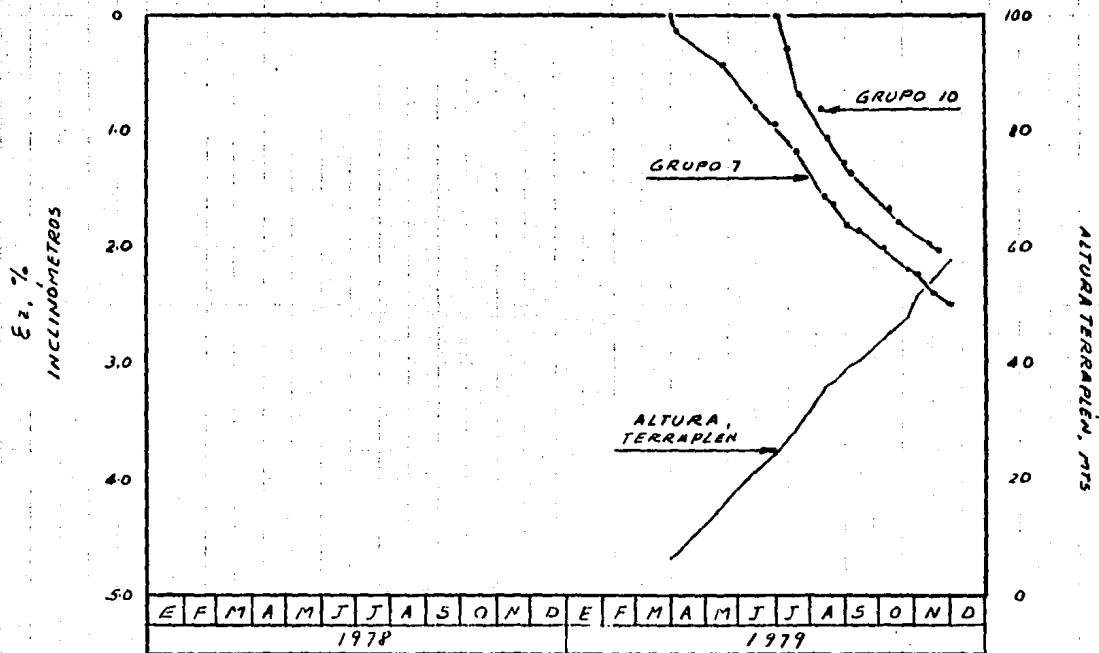
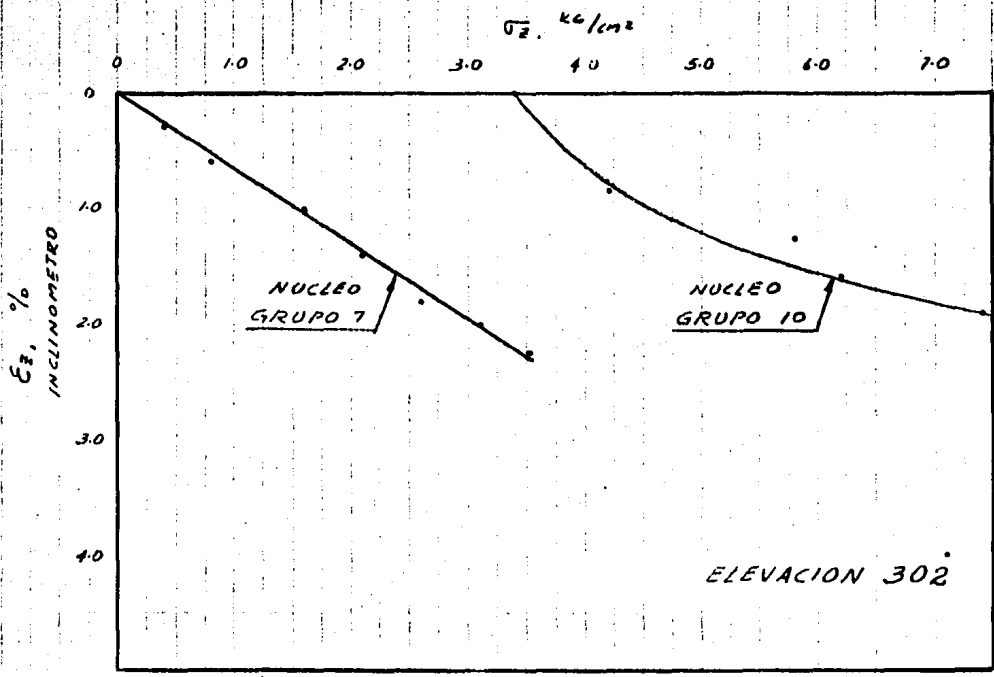


FIGURA 4.46



RELACIONES ESFERAS - DEFORMACION VERTICALES

FIGURA 4.47

## 5. COMPARACIONES DE RESULTADOS DE ANALISIS NUMERICOS E INSTRUMENTACION

Se presentan en este capítulo algunas comparaciones significativas entre los resultados de los análisis numéricos y los de instrumentación.

Los resultados que servirán para dichas comparaciones son los obtenidos en los grupos de análisis 4 y 5, ya mencionados en el Capítulo 3 .

Es importante, al hacer las comparaciones, tener en cuenta que existen limitaciones tanto en las mediciones de campo, como en la simulación numérica. En el Capítulo 3 se mencionaron las hipótesis requeridas para la ejecución de los análisis bidimensionales, tanto en lo que respecta a las relaciones esfuerzo - deformación de los materiales como en las suposiciones necesarias respecto a estados de esfuerzos o deformaciones de la sección estudiada. Posteriormente en el Capítulo 4 se pusieron en evidencia las incompatibilidades que se presentan en la medición de deformaciones y esfuerzos. La experiencia que se tiene con los resultados de la instrumentación de varias presas anteriormente construidas, ha puesto en evidencia la utilidad de la información obtenida, pese a sus limitaciones, para ayudar a comprender y prever el comportamiento de estas estructuras.

Las comparaciones que aquí se pretenden hacer, tienen el ob-



reto de evaluar inicialmente las hipótesis adoptadas en los análisis numéricos y posteriormente evaluar en que medida estos métodos han reproducido los fenómenos de interacción, muy importantes, en la presa Chicoasén. Se considera que confrontaciones cuantitativas con las mediciones de campo solo tienen sentido, si las suposiciones de los análisis numéricos son congruentes con el comportamiento real de la estructura.

### 5.1 Evaluación de las hipótesis de Análisis

En los últimos análisis bidimensionales, se ha supuesto que en ambas secciones máximas de la presa se presenta un estado de deformación plana. Tal suposición de análisis se adoptó cuando solo se tenían las primeras lecturas de campo, que mostraban que en los grupos del eje central del núcleo y los restantes contenidos en la sección longitudinal máxima de la presa, mostraban deformaciones unitarias horizontales muy pequeñas, cercanas a cero, que hacían suponer que un estado de deformación plana podría resultar representativo de estas secciones, figuras 4.28 a 33.

El desarrollo subsecuente de esfuerzos y deformaciones durante la construcción de la presa, muestra que solo aproximadamente en la sección longitudinal de la presa se presenta un estado de deformación plana. Los grupos colocados en el filtro de aguas abajo, elevación 302, y en el enrocamiento, elevación 245, registran las mayores discrepancias respecto a este estado de deformaciones. En la sección transversal máxima se presenta un estado de deformación mucho más complejo; en

la parte central las deformaciones ocurren en un plano perpendicular, mientras que cerca a las laderas se presenta un estado triaxial de deformaciones. La simulación correcta de esta sección mediante análisis bidimensionales resulta imposible, si a toda la evidencia anterior se añade que estados de esfuerzos planos no se presentan ni aproximadamente en las secciones máximas del prototipo.

Los resultados generales de los análisis tienen, entonces, solo un valor cualitativo. En la sección transversal máxima, los resultados numéricos servirán para analizar el efecto de interacción entre laderas sobre los estados de esfuerzos resultantes; no tendrá ningún sentido establecer comparaciones cuantitativas de deformaciones, cuando ya se han establecido las limitaciones del estado general de deformaciones supueste. En la sección longitudinal máxima los resultados de esfuerzos, permitirán en forma cualitativa establecer la importancia de la interacción entre zonas de la presa sobre la interacción núcleo - laderas. En esta sección a pesar de que las condiciones de deformación están bien representadas, las confrontaciones cuantitativas en sí no tienen mucho sentido, pues según los resultados de la instrumentación, se ha establecido que aún en las elevaciones superiores, 245 y 302, hay interacción del núcleo con las laderas, y dicha interacción no se toma en cuenta en el análisis numérico. También puede ser posible establecer el comportamiento teórico relativo entre las zonas de la presa y el real observado en el prototipo. Se presentará además, una discusión crítica acerca de la presencia de zonas de plastificación en esta sección de la

presa.

## 5.2 Comparación de resultados

### 5.2.1 Fenómenos de interacción

#### 5.2.1.1 Generalidades

Los resultados numéricos generales, respecto a estados de esfuerzos se muestra en las figuras 5.1 a 3, en las dos secciones de análisis. En la sección longitudinal máxima se aprecian concentraciones de esfuerzos en ambos filtros. Los esfuerzos correspondientes a una elevación dada, son menores en el núcleo que en las zonas adyacentes. En la sección transversal máxima, figura 5.3, el efecto de la zona húmeda colocada en el contacto con las laderas, ha producido la presencia de esfuerzos bajos en su vecindad, respecto a los registrados en el centro del núcleo. El efecto de la interacción con las laderas ha provocado la generación de esfuerzos bajos en la parte inferior del cañón.

Para analizar en forma concreta los fenómenos anteriormente mencionados, se han calculado los esfuerzos obtenidos en los análisis numéricos, en los sitios donde se han colocado grupos de medición.

#### 5.2.1.2 Parte baja del cañón

Los resultados obtenidos en las localizaciones correspondientes al eje central del núcleo se muestran en las figuras 5.4

a 7. Se muestran tanto los resultados de las dos secciones de análisis, como los resultados del grupo de medición correspondiente en la presa.

Referente a los resultados de los análisis numéricos, se observa que los esfuerzos verticales en la elevación 152, obtenidos en las secciones máximas de la presa presentan diferencias apreciables, figura 5.4. Estas diferencias se van atenuando en las elevaciones superiores, 190, 245 y 302, tal como puede apreciarse en las figuras 5.4 a 7. Es importante insistir que los análisis en la sección transversal máxima toman en cuenta la geometría del cañón, que en las elevaciones inferiores presenta una garganta estrecha, mientras que aquellos de la sección longitudinal no. Según lo anterior, es evidente que los resultados numéricos muestran que en las elevaciones inferiores ocurre una fuerte interacción con las laderas que ha provocado el desarrollo de esfuerzos bajos, y que dicho efecto disminuye con la altura debido al ensanchamiento del cañón.

La diferencia relativa entre los esfuerzos teóricos resultantes en las dos secciones máximas en la elevación 152, dan una idea cualitativa de la mayor influencia de la interacción núcleo - laderas sobre el desarrollo de bajos esfuerzos, respecto a la interacción núcleo - filtros.

Los esfuerzos verticales medidos en los instrumentos colocados en el eje del núcleo, en las localizaciones que aquí se discuten, indican que en la elevación 152 los valores registrados

son bajos y aumentan en las elevaciones superiores tal como se muestra en las figuras 5.4 a 7 .

Según lo anterior, la variación cualitativa de los esfuerzos medidos, coincide con los resultados teóricos obtenidos en la sección transversal.

Los diagramas de esfuerzos verticales con la altura del terraplén, resultantes de los análisis numéricos y de las mediciones de campo, correspondientes a una altura del terraplén de 310 m.s.n.m., se muestra en la figura 5.8. Para efectos comparativos se muestra el diagrama *075/83*. Es evidente la similitud de los diagramas medidos y resultantes de la sección transversal en las elevaciones inferiores.

#### 5.2.1.3 Comportamiento de la zona húmeda de arcilla

En el capítulo 4 se estableció que los estados de esfuerzos generados en las cercanías de la ladera izquierda, en las elevaciones 245 y 302, eran mayores que en la parte central del núcleo a las mismas elevaciones, figuras 4.19 y 26, y 4.20 y 27.

En la Tabla 5.1 se muestran los estados de esfuerzos resultantes de los análisis numéricos, en las elevaciones 245 y 302, en las localizaciones de los grupos de medición 3, 6, 7 y 10, para dos alturas de terraplén. Se puede apreciar que los esfuerzos cerca a las laderas en las dos elevaciones en mención son menores que los del núcleo en la parte central. La

distribución de esfuerzos verticales en estas localizaciones se muestran en las figuras 5.9 y 10.

Existen según lo anterior, discrepancias significativas entre los resultados de los análisis numéricos efectuados en la sección transversal máxima y las mediciones de campo.

#### 5.2.1.4 Interacción entre zonas de la presa

En las figuras 5.11 a 15 se muestran las comparaciones de esfuerzos en los Grupos contenidos únicamente en la sección longitudinal máxima de la presa. En las elevaciones 245 y 302 debido al efecto menor entre las laderas se presentan mejores concordancias entre los resultados de los análisis numéricos y las mediciones. En la figura 5.15 se aprecian discrepancias muy notables en la localización correspondiente al Grupo 9, que se atribuyen a un mal funcionamiento de la celda. La interacción entre las zonas de aguas abajo en las elevaciones 245 y 302, se muestran en las figuras 5.16 y 17. Las diferencias relativas entre los esfuerzos registrados en el núcleo, filtro y enrocamiento de aguas abajo en la elevación 245 son muy similares. En la elevación 302 se presenta una discrepancia notable en el material de transición, pero ya se mencionó anteriormente el comportamiento defectuoso de la celda.

De los razonamientos anteriores se ha puesto en evidencia la bondad de los resultados de elementos finitos respecto a esfuerzos. Ha sido posible confirmar los fenómenos de interac-

ción entre el núcleo y laderas, y entre el núcleo y las zonas aledañas, puestos en evidencia por los resultados de las mediciones de campo. Además de lo anterior, ha sido posible tener una idea cualitativa de la importancia relativa de estos fenómenos de interacción sobre la presencia de bajos esfuerzos en la parte inferior del núcleo. Las discrepancias mayores se presentaron en los resultados cercanos a la ladera izquierda, pero ya en la sección anterior se había hecho mención respecto a que la suposición de análisis de un estado de deformación plana no era representativo de las condiciones de campo que se están desarrollando en esta parte del núcleo.

#### 5.2.2 Resultados de deformaciones unitarias

Los resultados de deformaciones unitarias dadas por los análisis numéricos muestran discrepancias muy apreciables con los resultados de las mediciones, no solo cuantitativamente como ya fué establecido en el Capítulo 3, sino relativamente, al comparar el comportamiento entre las diferentes zonas de la presa. Para ilustrar la afirmación anterior en la Tabla 5.2 se presentan las deformaciones unitarias verticales y horizontales, resultantes de los análisis numéricos efectuados en la sección longitudinal máxima de la presa y las medidas en el prototipo mediante extensómetros. El comportamiento relativo de las zonas de materiales de aguas abajo muestran que en el núcleo se presentan deformaciones menores que en el filtro y el enrocamiento. Las mediciones de campo indican lo contrario. La comparación de las deformaciones horizontales, muestran discrepancias similares. Esto pone de presente una

vez mas la poca confiabilidad que los análisis numéricos tienen respecto a los resultados de deformaciones.

### 5.2.3 Zonas de plastificación

Ya que los fenómenos de interacción entre laderas es menor en la elevación 245 que en las inferiores, y teniendo en cuenta que la suposición de un estado de deformación plana en la sección longitudinal máxima de la presa es buena, resulta interesante investigar de los análisis teóricos que tan cerca de la plastificación se encuentran las zonas cercanas a los grupos 3, 4 y 5.

Se han elaborado, para lo anterior, los diagramas  $p - q$  en base a los resultados de esfuerzos principales, figuras 5.13 a 20. Estos resultados indican que en las zonas de filtros y enrocamientos de aguas abajo en esta elevación, se han moviliado mayores esfuerzos de corte respecto a los de falla, que en el núcleo. Los resultados mostrados en las figuras 4.36, 38 y 39, obtenidas de los resultados de los instrumentos, indican comportamientos opuestos a los obtenidos del elemento finito.

Estos resultados explican la razón por la que existen discrepancias en los valores relativos de deformaciones unitarias entre el núcleo, filtro y enrocamiento, entre los resultados del elemento finito y las mediciones de campo.



LOCALIZACION	ELEVACION	ELEVACION TERRA PLEN 278		ELEVACION	ELEVACION TERRA PLEN 345	
		$\sigma_1$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_3$ Kg/cm <sup>2</sup>		$\sigma_1$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_3$ Kg/cm <sup>2</sup>
Núcleo - Centro	245	- 7.0	- 3.7	302	- 9.6	- 5.0
Núcleo - Ladera Izq.	245	- 3.0	- 0.4	302	- 3.0	- 0.6

TABLA 5.1 . RESULTADOS DE ANALISIS NUMERICOS EN LA SECCION TRANSVER-  
SAL MAXIMA. ESFUERZOS PRINCIPALES EN EL NUCLEO Y ZONAS  
CERCANAS A LA LADERA IZQUIERDA.

LOCALIZACION	ELEVACION	ANALISIS NUMERI CCS		INSTRUMENTACION	
		$\epsilon_x$ $\frac{1}{2}$	$\epsilon_y$ $\frac{1}{2}$	$\epsilon_x$ $\frac{1}{3}$	$\epsilon_y$ $\frac{1}{3}$
Núcleo - Centro	245	- 2.0	- 0.1	- 4.8	+ 0.5
Filtro - A. Abajo	245	- 3.3	+ 0.5	- 2.4	+ 0.0
Enroc. - A. Abajo	245	- 2.1	+ 0.3	- 3.2	+ 0.3

TABLA 5.2 . COMPARACION DE DEFORMACIONES UNITARIAS.  
ELEVACION DEL TERRAPLEN 352

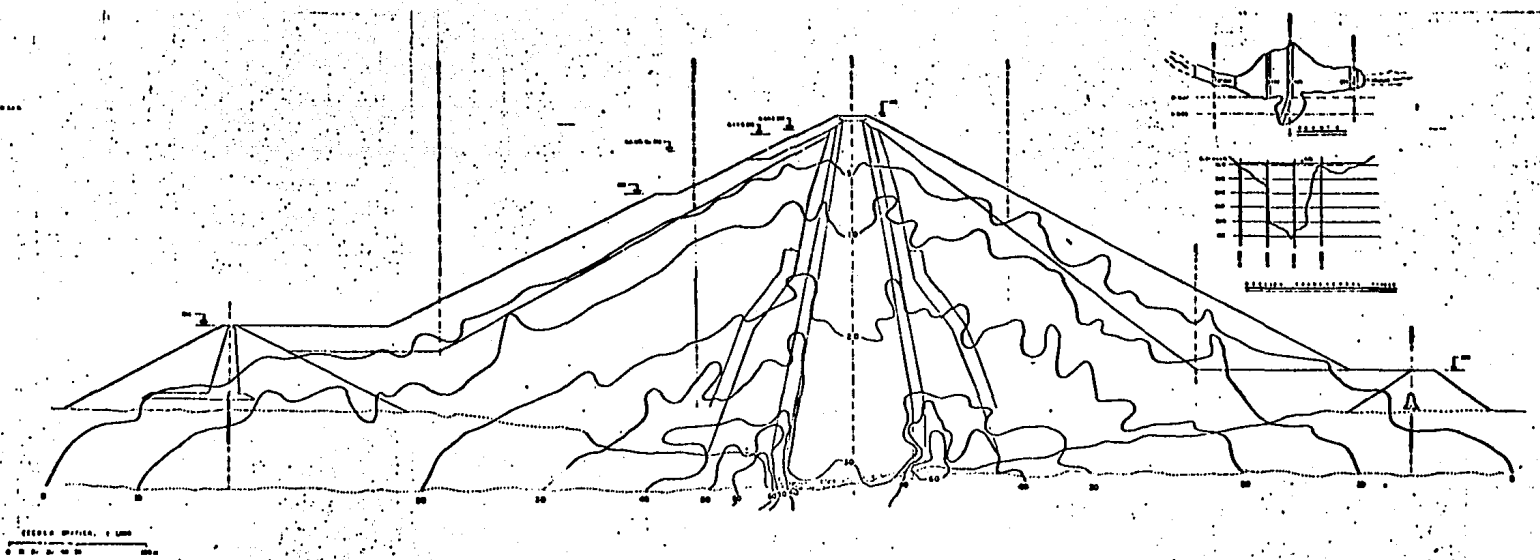


FIGURA 5.1 . CONTOURNOS DE IGUALES ESFUERZOS VERTICALES, EN  $Kg/cm^2$  . GRUPOS DE ANALISIS BIDIMENSIONALES No 5

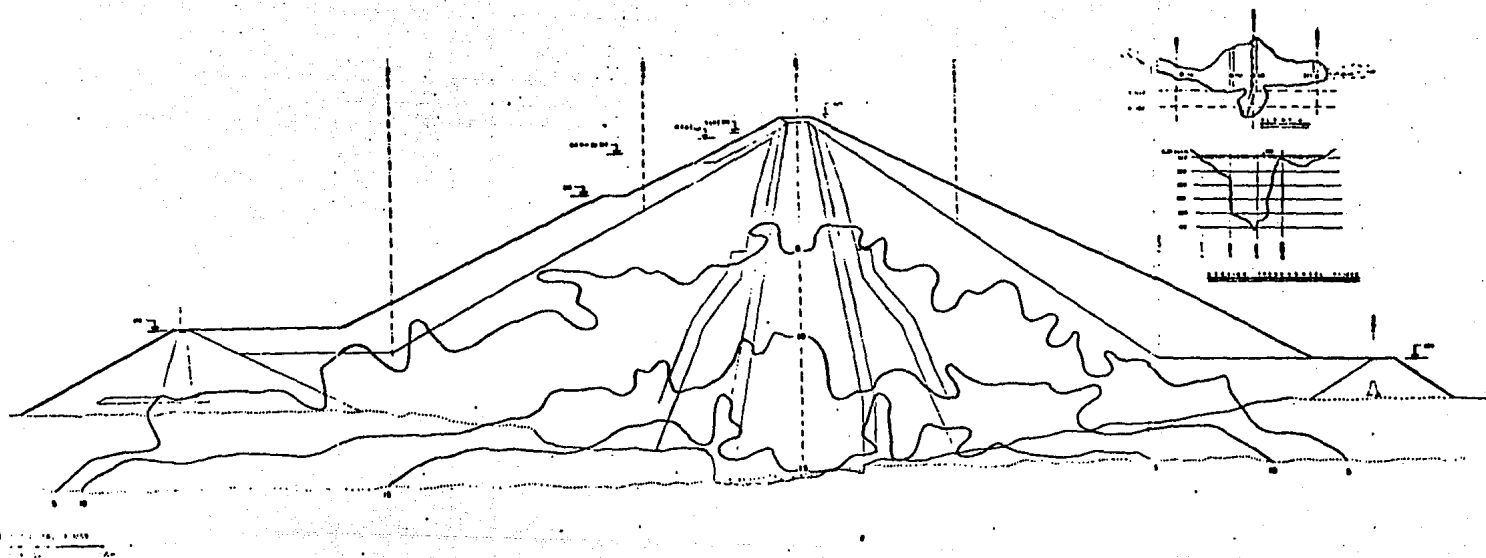
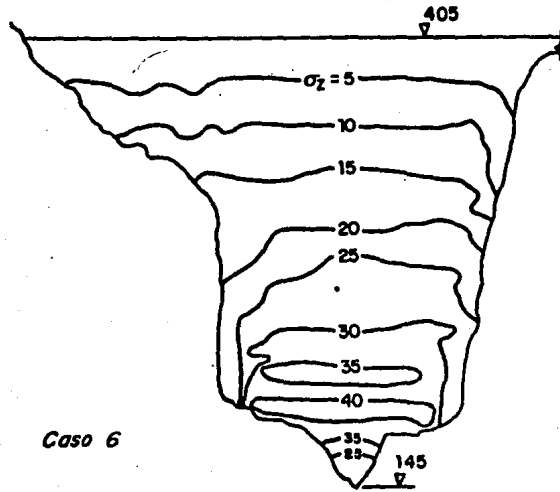


FIGURA 5.2 . CONTOURNOS DE IGUALES ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA DIRECCION EJE  
CONTINUA , EN  $Kg/cm^2$ . GRUPO DE ANALISIS BIDIMENSIONAL No 5

M.I.

M.D.

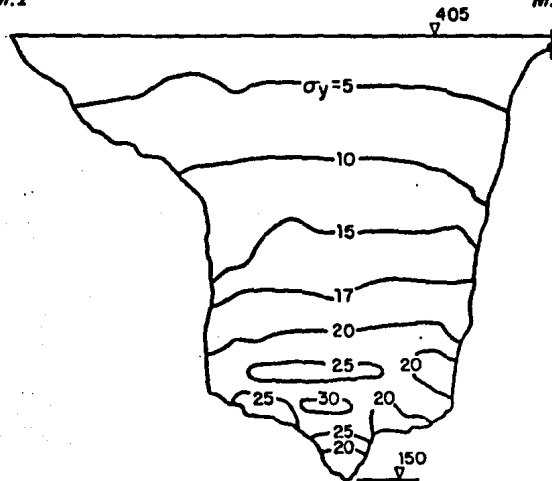


Caso 6

Esfuerzos  $\sigma_z$ ,  $\text{kg/cm}^2$

M.I.

M.D.



Esfuerzos horizontales  $\sigma_y$ , en  $\text{kg/cm}^2$

FIGURA 5.3 . CONTORNIOS DE IGUALES ESFUERZOS VERTICALES Y HORIZONTALES EN LA DIRECCION EJE CORTINA, EN  $\text{Kg/cm}^2$ . GRUPO DE ANÁLISIS BIDIMENSIONAL No 4

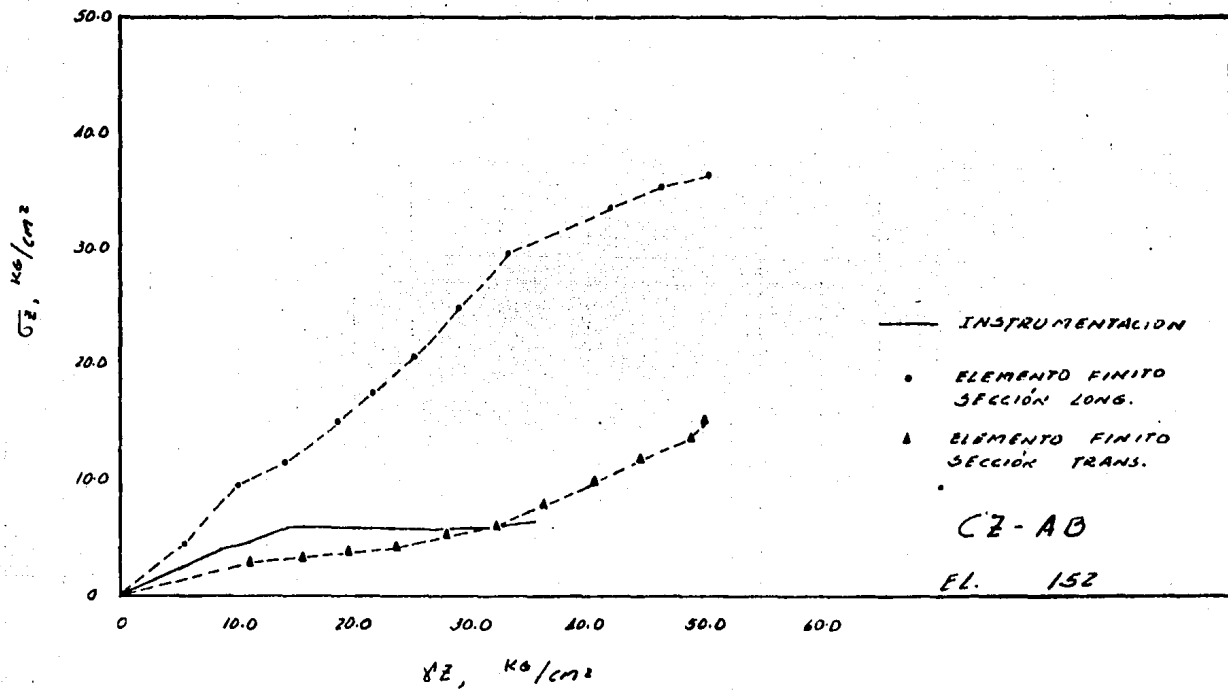


FIGURA 4

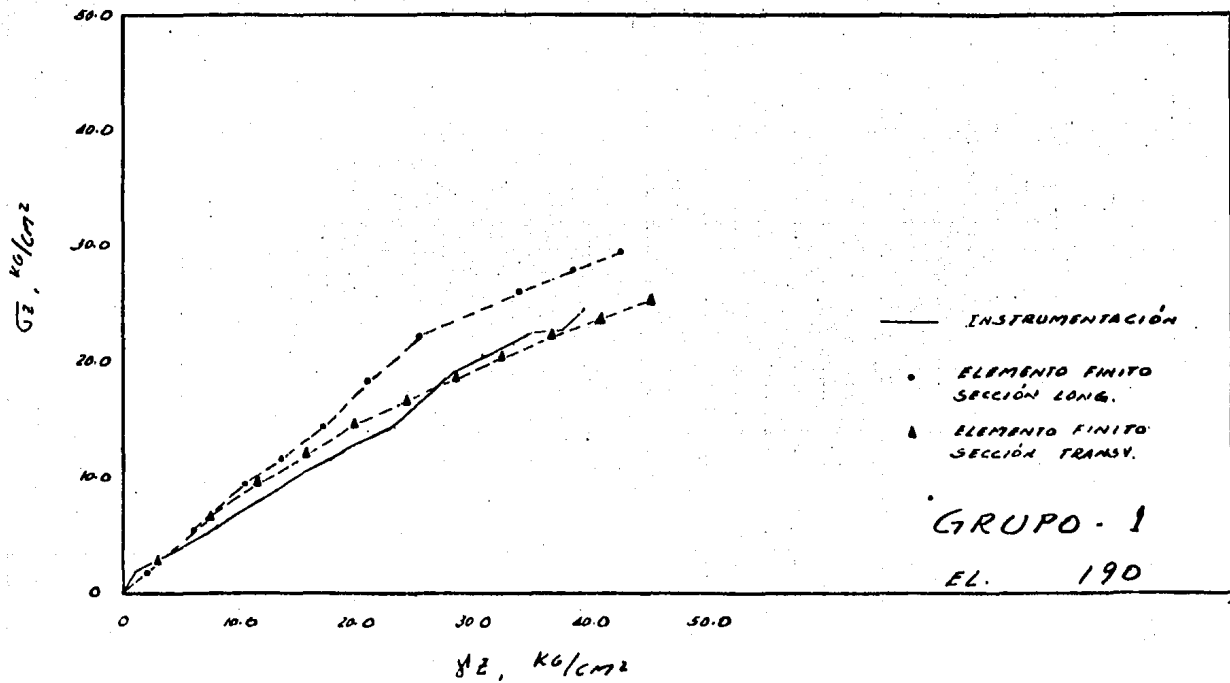


FIGURA 5.5

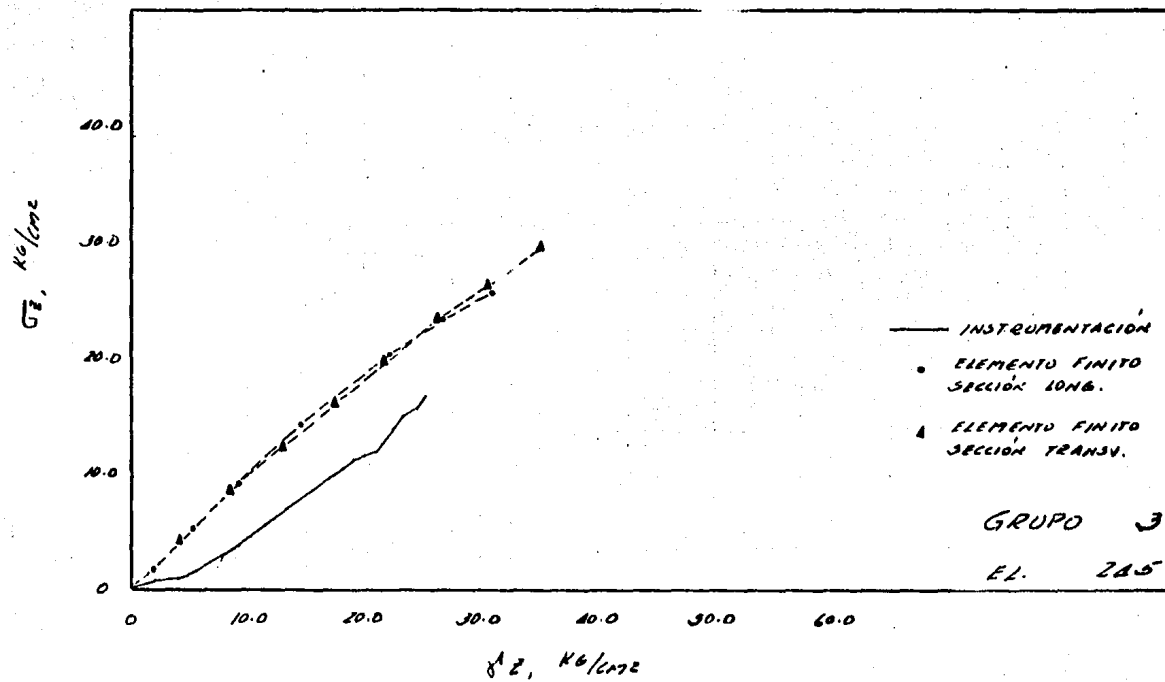


FIGURA 5.6

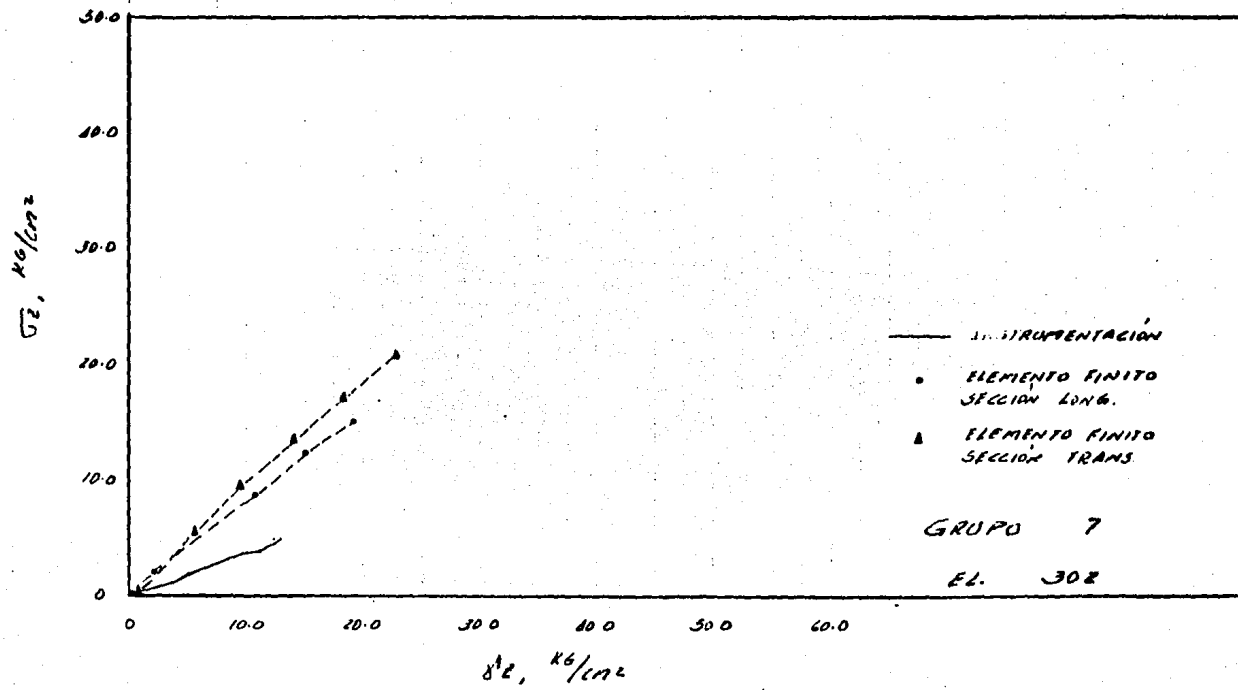
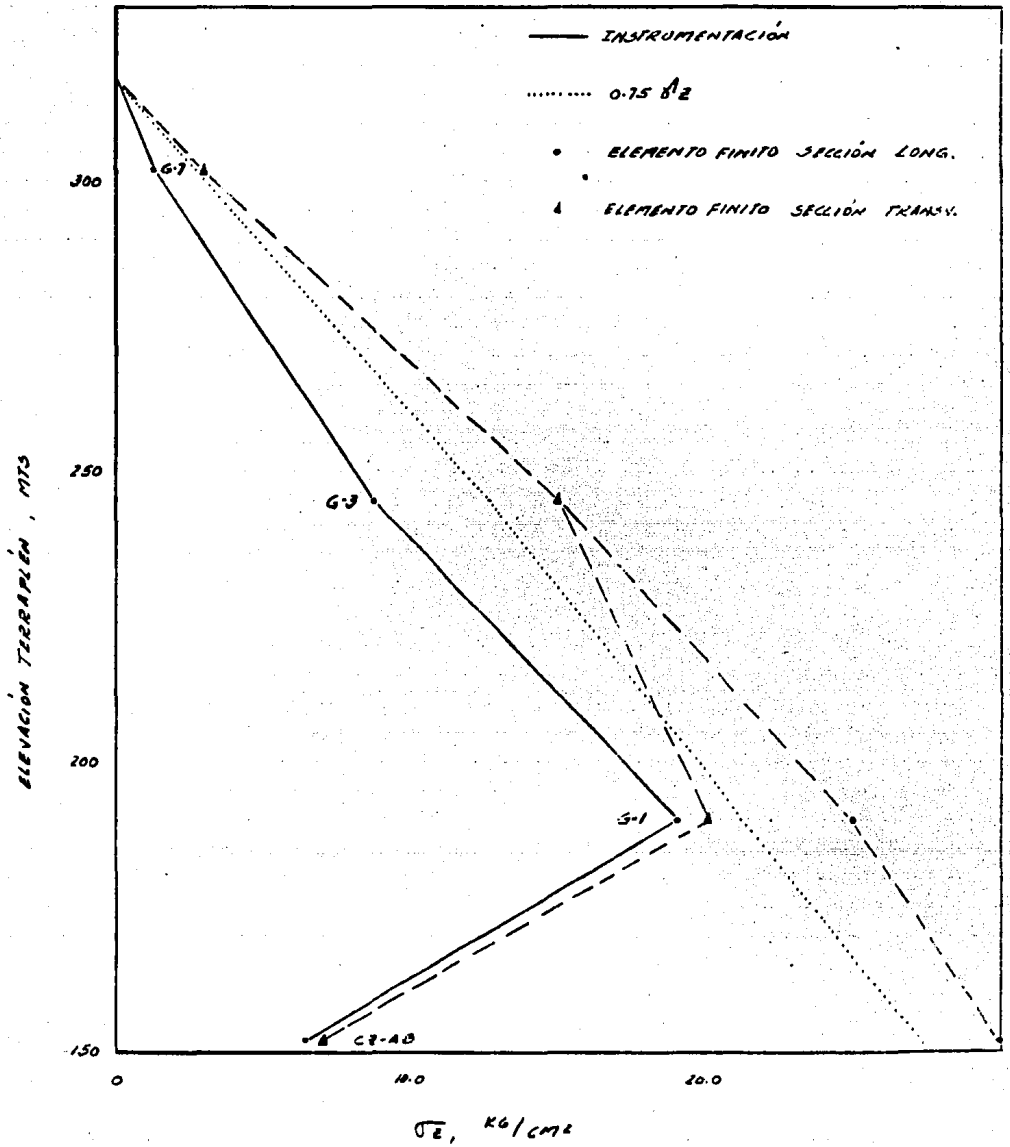


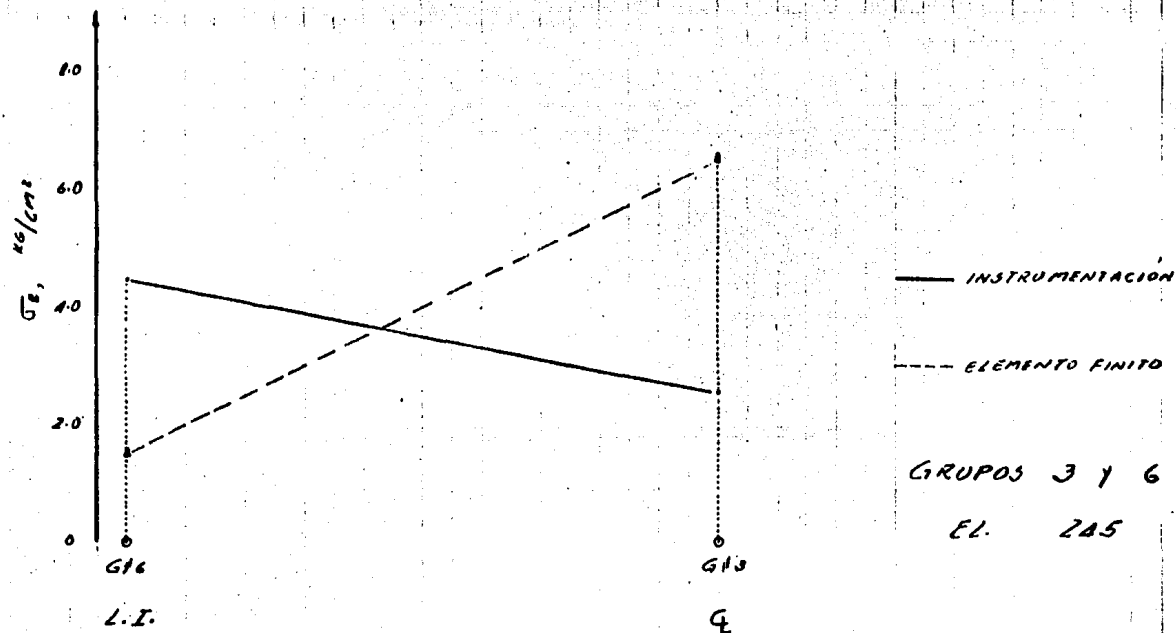
FIGURA 5.7





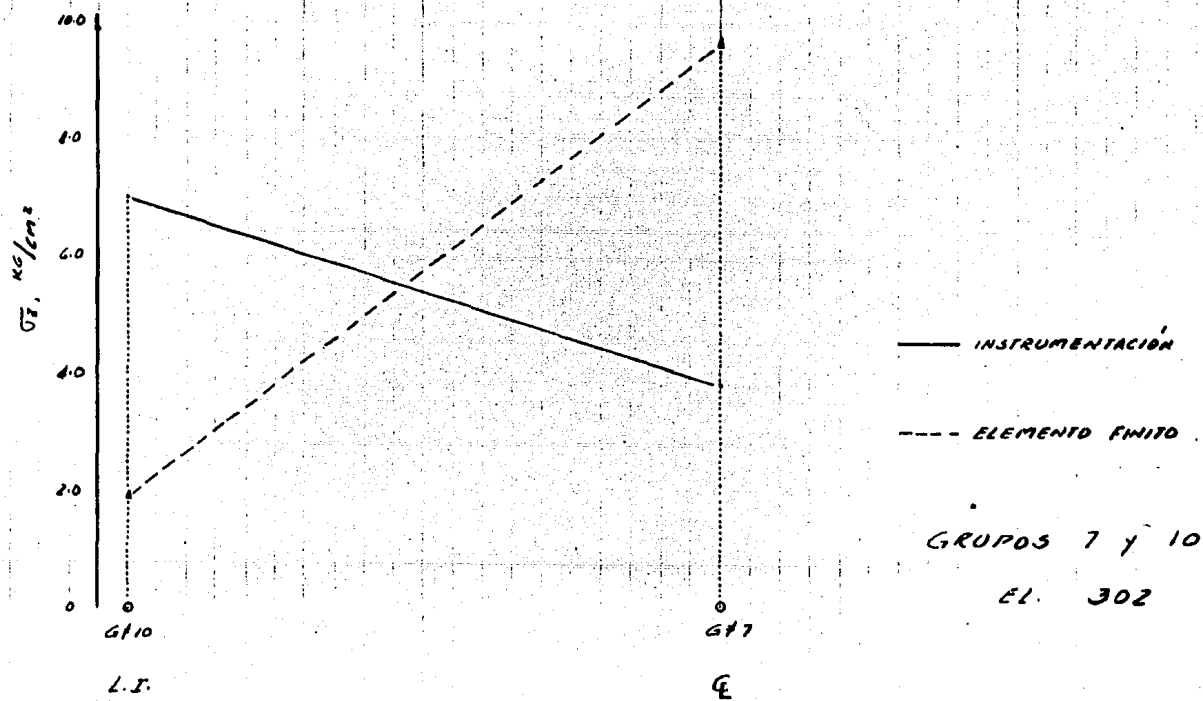
DIAGRAMAS DE ESFUERZOS VERTICALES EN EL NUCLEO

FIGURA 5-2



ESFUERZOS VERTICALES EN EL NUCLEO SECCIÓN  
 TRANSVERSAL - ELEV. TERRAPLEN 277.5

FIGURA 5.9



ESFUERZOS VERTICALES EN EL NUCLEO - SECCIÓN  
 TRANSVERSAL - ELEV. TERRAPIÉN 345

FIGURA 5.10

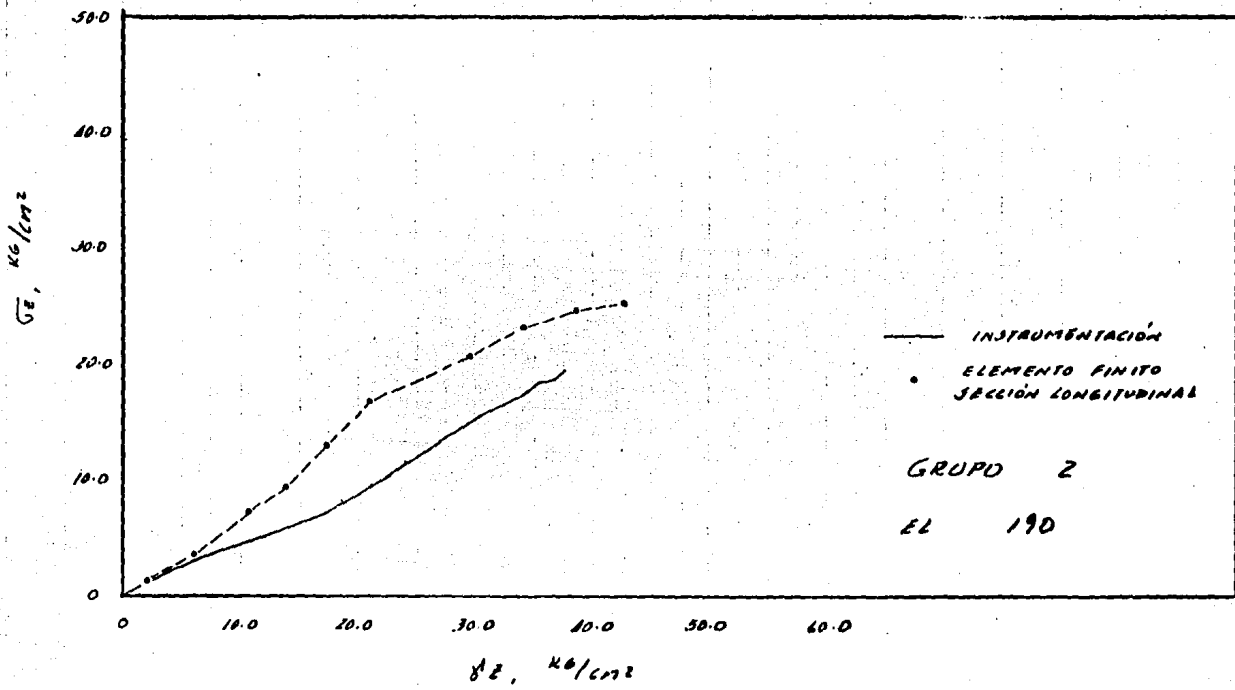


FIGURA 5.11

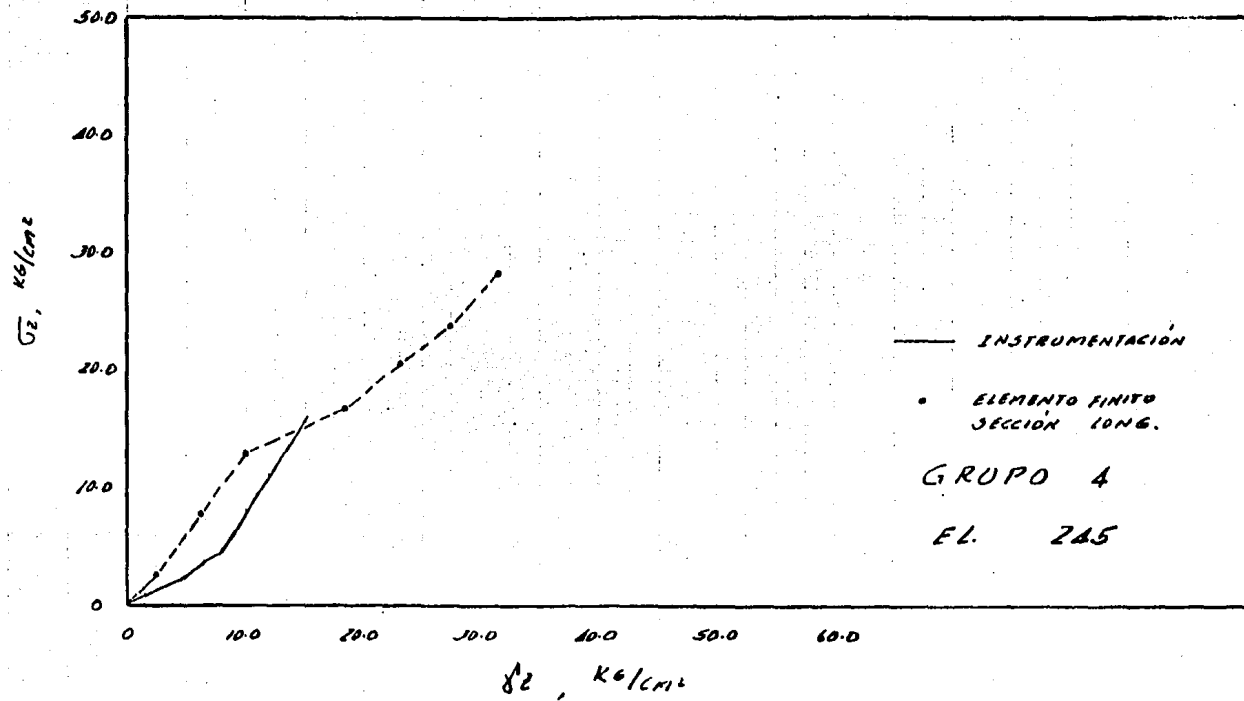


FIGURA 5.12

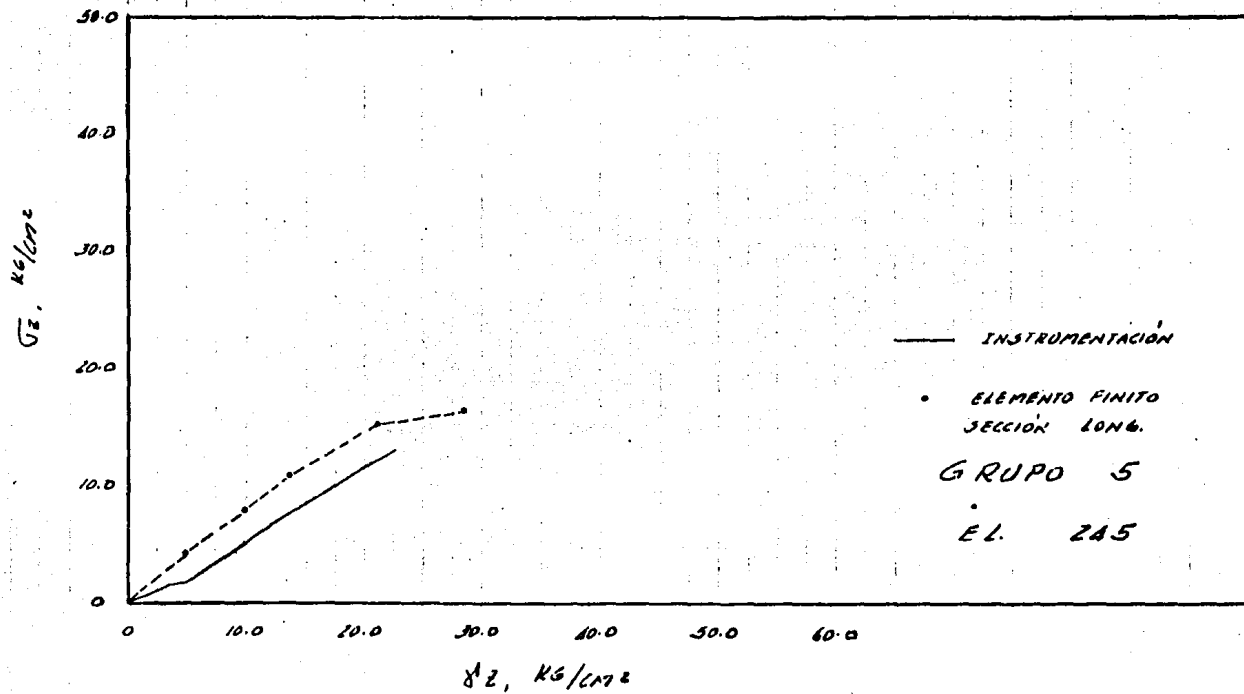


FIGURA 5.13

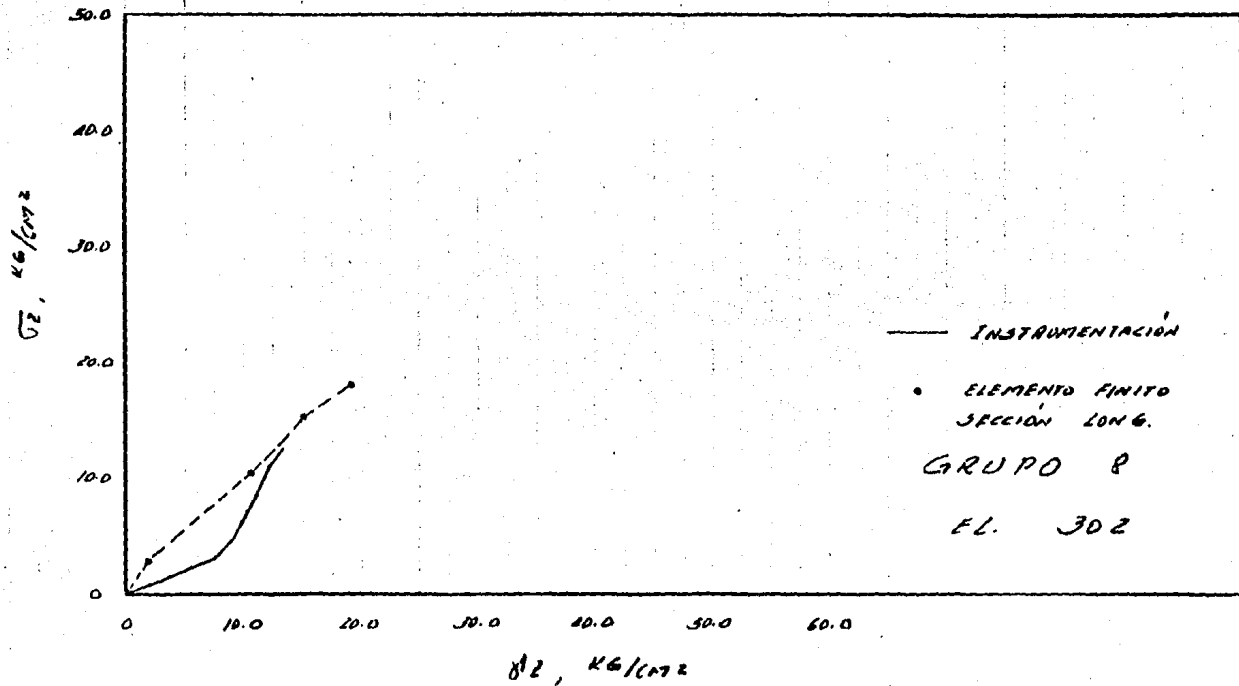


FIGURA 5.14

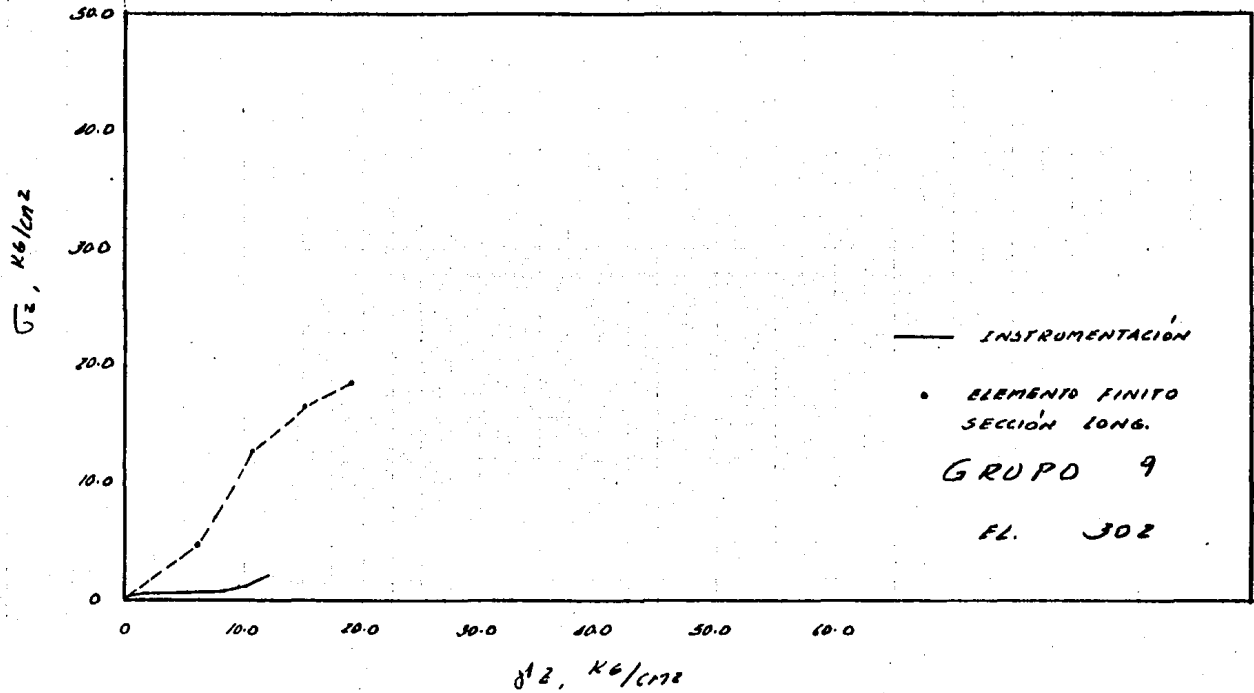
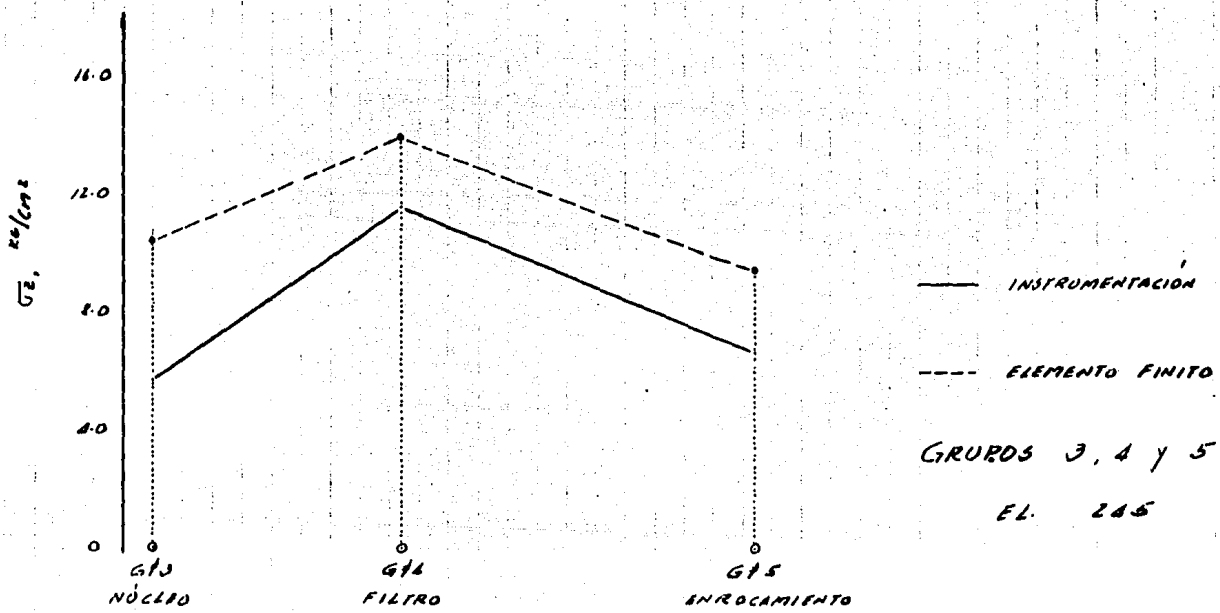


FIGURA 5.15

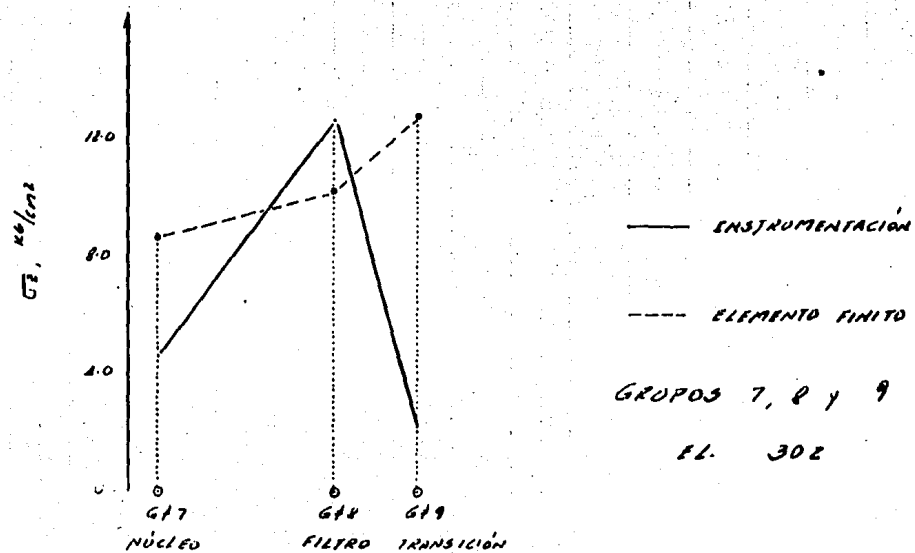




INSTRUMENTACIÓN  
 ELEMENTO FINITO  
 GRUPOS 3, 4 y 5  
 EL. 285

ESFUERZOS VERTICALES EN EL NÚCLEO Y ZONAS ADYACENTES  
 SECCIÓN LONGITUDINAL - ELEV. TERRAPLÉN : 300

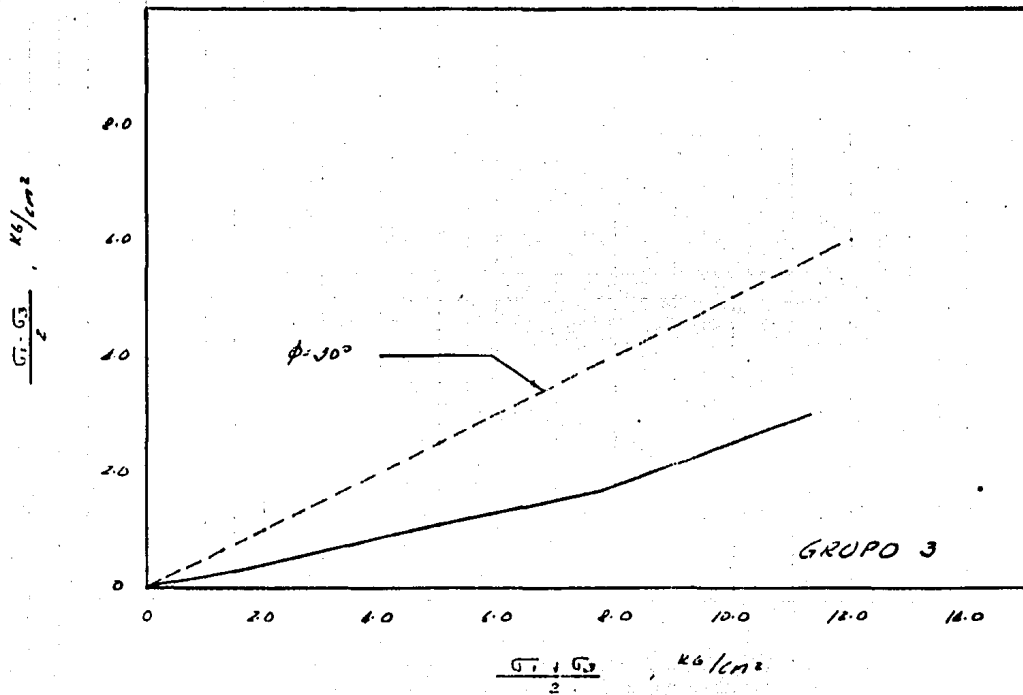
FIGURA 5.16



GRUPOS 7, 8 y 9  
EL. 302

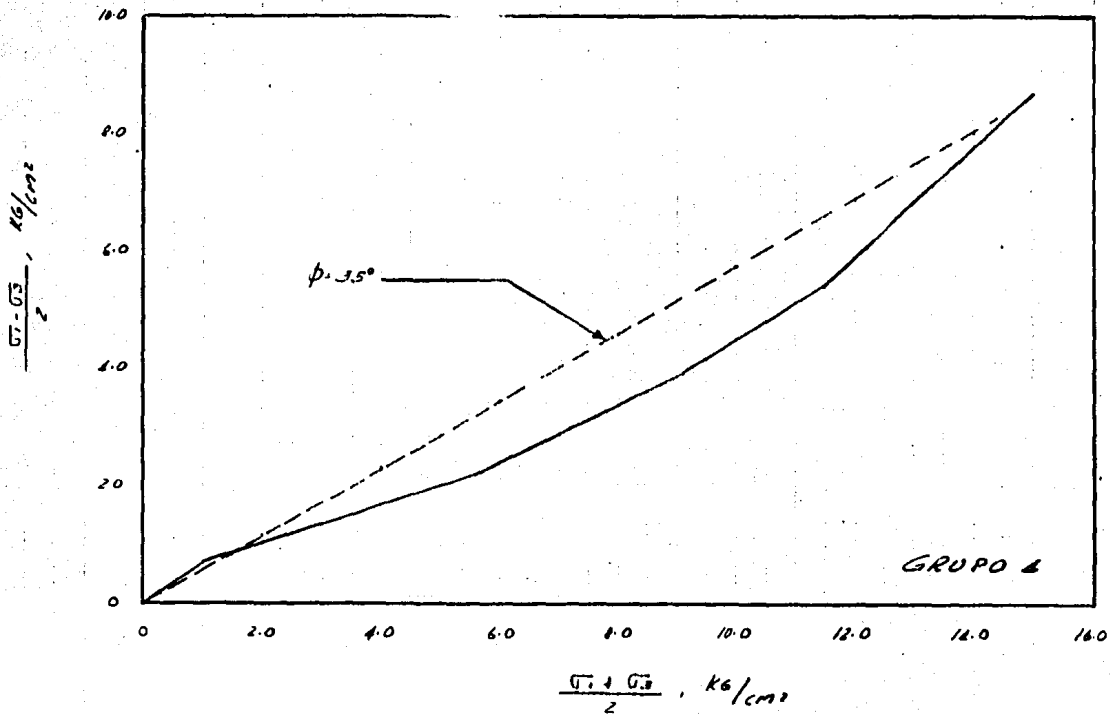
ESFUERZOS VERTICALES EN EL NÚCLEO Y ZONAS  
ADYACENTES - SECCION LONGITUDINAL - EL. TERRAPIEN 360

FIGURA 5.17



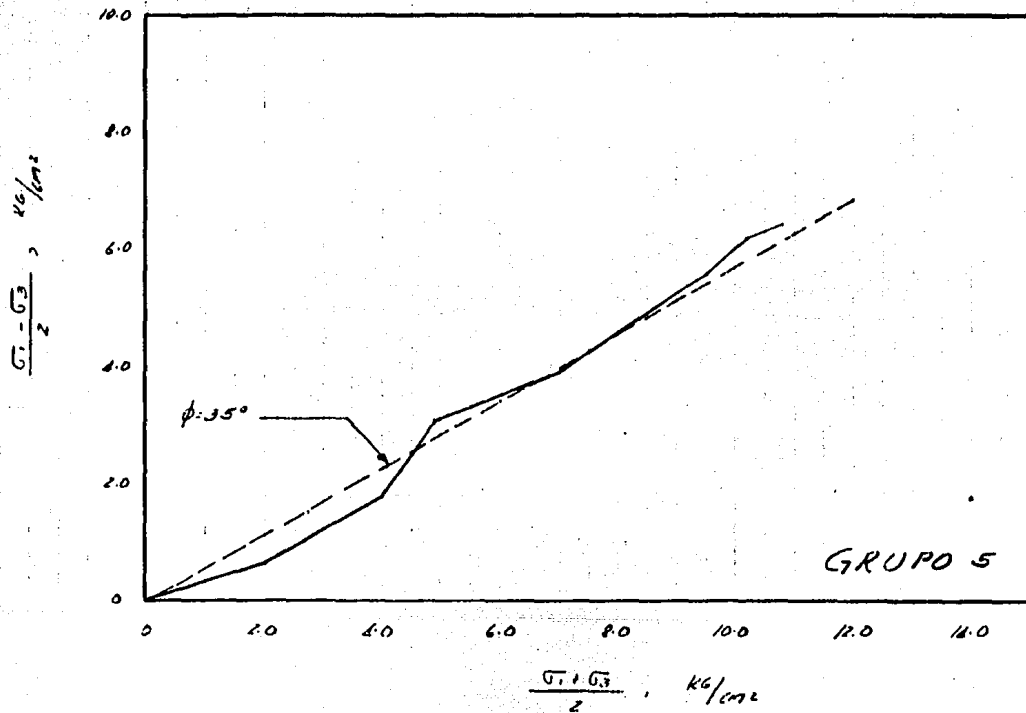
RESULTADOS EN LA SECCION LONGITUDINAL MA-  
XIMA - ELEMENTOS FINITOS

FIGURA 5.18



RESULTADOS EN LA SECCION LONGITUDINAL MA-  
XIMA - ELEMENTOS FINITOS

FIGURA 5.19



RESULTADOS EN LA SECCION LONGITUDINAL  
 MÁXIMA - ELEMENTOS FINITOS

FIGURA 5.20

6.

## CONCLUSIONES

Para observar el comportamiento de la presa Chicoasén, se han instalado instrumentos que permiten la medición de esfuerzos totales, presiones de poro, desplazamientos verticales y horizontales y deformaciones unitarias. Con el objeto de investigar en algunos puntos de interés los estados de esfuerzos y deformaciones se han instalado Grupos de instrumentos que permiten la medición de esfuerzos y deformaciones en seis direcciones diferentes.

Para analizar problemas específicos identificados desde las primeras etapas de diseño se ejecutaron análisis de elementos finitos bi y tridimensionales, en base a cuyos resultados se han hecho cambios importantes en el diseño de la presa. De los resultados de estos análisis los cambios adoptados en el diseño de la presa han sido:

a) Adopción de la colocación de un núcleo central contra la alternativa inicial que contemplaba uno inclinado. Los desplazamientos y esfuerzos resultantes mostraron distribuciones más convenientes para el caso de un núcleo central, que para el de un núcleo inclinado, figura 3.2 .

b) Colocación de zonas de enrocamiento uniforme aguas arriba y abajo, con el objeto de inducir cargas adicionales en el núcleo, para prevenir el fracturamiento hidráulico, figura 3.3.

c) Colocación de zonas más húmedas de arcilla en el contacto del núcleo con ambas laderas. El ob

jetivo es el de tener una zona de material mas deformable, y reducir fenómenos de interacción, figura 3.3 .

d) Definir la geometría de la zona húmeda en las partes superiores de la ladera izquierda, para reducir en lo posible tensiones en la zona aledaña al cambio abrupto de pendiente, figura 3.19. .

Los primeros resultados de la instrumentación de la presa han permitido establecer una secuencia práctica y racional de cálculo para la estimación de los parámetros de los materiales, Anexo 1 . Los resultados de los análisis efectuados con estos parámetros se han confrontado con las mediciones de campo.

## 6.1 Instrumentación

La distribución de los instrumentos de la presa, ha permitido establecer comparaciones entre los resultados de deformaciones unitarias verticales obtenidas de dos tipos de instrumentos diferentes, inclinómetros y extensómetros. Los resultados muestran discrepancias sistemáticas entre unas y otras, aunque las tendencias son similares, figuras 4.44 y 45.

Para entender la ocurrencia de tales diferencias, es necesario tener en mente el funcionamiento y la forma en que se instalaron los dos tipos de instrumentos. Los inclinómetros son, básicamente, una tubería que se ha prolongado en secciones mediante la utilización de uniones telescópicas, que permiten el movimiento relativo entre secciones. La tubería se halla embebida en ma-

terial seleccionado de la zona típica de instalación, libre de sobretamaños, y compactado con métodos manuales. El deslizamiento entre secciones de la tubería ocurre al estar arrastrada por el material adyacente y una vez que se vence la fricción que exista en las uniones. Los extensómetros se hallan embebidos completamente en el material seleccionado de la zona de instalación respectiva, que rellena la trinchera de instalación. Es de esperarse por tanto que los extensómetros registren deformaciones mayores que los inclinómetros. Es evidente también que ninguno de los resultados obtenidos representa el valor real de las deformaciones de los materiales de la presa.

En algunos de los Grupos de instrumentos se han duplicado las lecturas de esfuerzos, lo que ha permitido llevar a cabo una confrontación de resultados. A pesar de que las celdas son del mismo tipo y se han instalado y observado siguiendo la misma metodología, se han presentado discrepancias poco sistemáticas. Dichas discrepancias se atribuyen a la calidad de las celdas y a los procesos de instalación.

Con lo anterior se ponen en evidencia las dificultades que se presentan al llevar a cabo un programa de instrumentación. La forma de poder esclarecer discrepancias de este tipo es la de tener adecuados controles de calidad y calibración de los instrumentos, supervisión metódica durante la instalación en el campo, e investigación de laboratorio que permita ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de los instrumentos.



La experiencia ha demostrado, a pesar de sus defectos, del gran valor cualitativo de los resultados de las mediciones de campo, que han permitido entender mejor el comportamiento complejo de estas estructuras.

#### 6.1.1 Resultados

Se ha identificado una fuerte interacción del núcleo con las laderas en la parte baja del cañón, lo que ha provocado el desarrollo de bajos esfuerzos. En las elevaciones superiores, 245 y 302, se presentan fenómenos de interacción menores. Los esfuerzos cerca a las laderas son mayores que los de la parte central del núcleo.

La evidencia obtenida de las curvas esfuerzo - deformación en las cercanías de la ladera izquierda y en la parte central del núcleo, indica que la zona húmeda se ha comportado de acuerdo a lo previsto, a pesar de que el efecto de arco no se ha eliminado completamente.

En las elevaciones 245 y 302 el mayor estado de esfuerzos presente en el filtro de aguas abajo pone de manifiesto la interacción entre zonas, debido a la menor compresibilidad del filtro respecto a las zonas aledañas. Fenómenos similares deben estar ocurriendo en las zonas equivalentes de aguas arriba.

De los resultados de las deformaciones medidas en varias direc-

ciones, ha sido posible establecer que en la sección longitudinal máxima se presenta un estado aproximado de deformación plana. En la sección transversal no se presenta ningún estado que pueda representarse correctamente por un análisis bidimensional.

El cálculo teórico de esfuerzos y deformaciones principales, indicó que las direcciones de instalación escogidas no eran las adecuadas. En el Anexo 2 se presentan los cálculos efectuados y una recomendación sobre las direcciones adecuadas.

## 6.2 Análisis numéricos

La limitación fundamental que se presenta en la ejecución de análisis numéricos, es la de la asignación de los parámetros de los materiales que permiten reproducir las relaciones esfuerzo-deformación correspondientes.

En los análisis bidimensionales efectuados para Chicoasén se ha hecho uso de expresiones que representan un ajuste a relaciones esfuerzo-deformación de pruebas triaxiales típicas. Como un acercamiento a la realidad en el caso de Chicoasén se han aprovechado los resultados de la instrumentación de la presa para la obtención de los parámetros, Anexo 1 .

La hipótesis fundamental de los análisis ha sido suponer estados de deformación plana en las dos secciones máximas. Los resultados de la instrumentación justifican al final esta hi

pótesis para la sección longitudinal máxima.

La ejecución de varios análisis efectuados considerando la geometría externa e interna última de la presa, han puesto en evidencia la poca sensibilidad de los resultados de esfuerzos a variaciones apreciables de los parámetros de los materiales, en zonas alejadas de contactos entre materiales de diferentes propiedades mecánicas. Los resultados de esfuerzos en las cercanías de dichos contactos, dependen de los valores relativos y absolutos de los parámetros de los materiales, que definen en los análisis numéricos el comportamiento esfuerzo - deformación. Las deformaciones resultantes en general, acusan una gran dependencia con los valores de los parámetros asignados a los materiales.

La evidencia anterior justifica los análisis de esfuerzos que puedan hacerse con parámetros no muy ajustados. Análisis con tales limitaciones se efectuaron en las etapas de diseño de Chicoasén, y sirvieron como norma de juicio para los cambios de diseño mencionados.

#### 6.2.1 Resultados

Los análisis numéricos confirman la presencia de bajos esfuerzos en la zona interior del núcleo, producto de una fuerte interacción con las laderas.

Los resultados independientes de las secciones máximas, per-

miten establecer la importancia relativa que sobre la ocurrencia de estos bajos esfuerzos tienen la interacción con las laderas respecto a la interacción entre zonas de la presa.

La interacción con las laderas en las elevaciones superiores y la generación de zonas de plastificación en la sección longitudinal máxima no concuerdan con el comportamiento observado de la estructura. Aunque es fiel la representación de la interacción entre zonas.

De acuerdo a las evidencias consignadas, puede afirmarse que los análisis bidimensionales son mas representativos en la sección longitudinal, suponiendo un estado de deformación plana. Los resultados de esfuerzos son en mucho, mas representativos que los de deformaciones. Resultados mas confiables pueden obtenerse en la sección longitudinal, si las relaciones esfuerzo - deformación fuesen las correspondientes a pruebas de deformación plana ejecutadas en el laboratorio, ya que se estarían representando mejor las condiciones de campo. Solo los resultados de análisis tridimensionales, que pueden tomar en conjunto los efectos de interacción, podrían dar resultados comparables cuantitativamente con los resultados de campo .

A-1.1 PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACION DE LOS PARAMETROS DE  
LOS MATERIALES

A-1.1.1 Módulo de deformación

El procedimiento que a continuación se describe se ha empleado para calcular los parámetros de los materiales en los últimos grupos de análisis bidimensionales, y fué sugerido en (10) .

La expresión básica que se usa para el módulo de deformación es :

$$\epsilon_1 = K (\sigma_3)^n \left[ 1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \right]^2 \quad (1)$$

El valor de n se ha supuesto igual a 0.4 para todos los materiales y se pretende hallar el valor de K.

Aprovechando la condición de que en algunos grupos de instrumentos se han registrado deformaciones unitarias horizontales cercanas a cero, y una condiciones axisimétrica de esfuerzos ( esfuerzos horizontales aproximadamente iguales ) con las direcciones principales muy cercanas a las direcciones vertical y horizontal, el coeficiente de reposo  $K_0$  puede expresarse como:

$$K_0 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\nu}{1 + \nu}$$

Teniendo en cuenta que los materiales de la presa son primordialmente friccionantes, es posible utilizar la relación empírica de Jaky:

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi \quad (11)$$

Tanto los valores de los esfuerzos como de las deformaciones unitarias se obtienen de los resultados de la instrumentación. Con estos datos se propuso para el cálculo de K el procedimiento siguiente:

1. Cálculo de los valores de la relación de Poisson,  $\nu$ , de ( I ) .

2. Cálculo de la relación  $\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)_t$  como:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)_t = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$$

donde  $\text{sen } \phi$  se calcula de ( II )

3. Cálculo de  $(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)$

4. Gráfica de las relaciones  $(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)$  vs  $\epsilon_1$

5. De las relaciones anteriores es posible estimar el valor de E, como la pendiente de dichas curvas.

6. Con los valores de E, se estima el valor de K de la expresión general.

En (10) se estimaron los parámetros para los dos materiales del núcleo, Tejería y Costilla, en base a la información de los grupos de instrumentos 1 y 3, y son los mostrados en la

Tabla 3.3. Los parámetros del Grupo 4B, utilizados para las comparaciones con los resultados de la instrumentación se calcularon en forma similar, pero utilizando las deformaciones unitarias obtenidas de los extensómetros.

Como complemento de la información del presente trabajo, se calcularon los parámetros para el filtro y el enrocamiento de aguas abajo siguiendo el procedimiento descrito, utilizando la información de extensómetros. Estos parámetros son los correspondientes al Grupo de análisis 5B, que se han consigna-do en la Tabla 3.5.

#### A-1.1.2 Relaciones de Poisson

En los Grupos de análisis mencionados, se supuso la relación de Poisson constante. Los valores se calcularon del paso 1 del procedimiento descrito en la sección anterior.

## ANEXO 2

### A-2.1 BREVE DISCUSION ACERCA DE LAS DIRECCIONES DE MEDICION DE ESFUERZOS PARA LA OBTENCION DE ESTADOS DE ESFUERZOS

En la Tabla 4.2 se muestran los cosenos directores de los vectores unitarios normales a los planos de medición escogidos para obtener los estados de esfuerzos en varios puntos de la presa Chicoasén. Como parte del presente trabajo se intentó obtener de esta información los esfuerzos principales. Se presenta a continuación los resultados algebraicos obtenidos.

#### A-2.1.1 Ecuaciones resultantes

Para conocer el estado de esfuerzos en un punto del medio continuo, es necesario conocer los esfuerzos en tres planos perpendiculares entre sí. Escogiendo como ejes de referencia los de la presa, es necesario conocer el tensor de esfuerzos:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Se tienen entonces tres incógnitas:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz}$$

Es necesario plantear tres ecuaciones en base a la información obtenida de las celdas  $C_{15}$ ,  $C_{D1}$  y  $C_{D2}$ .



Obteniendo matemáticamente las expresiones de estos tres esfuerzos, es posible encontrar las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z) - \sigma_{zs} \quad (1)$$

$$2\tau_{zx} - 2\tau_{yx} = 3\sigma_{zs} - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + 2\tau_{xy} \quad (2)$$

$$2\tau_{yx} - 2\tau_{zx} = 3\sigma_{zs} - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + 2\tau_{xy} \quad (3)$$

De (1) se obtiene directamente el valor de la incógnita  $\tau_{xy}$ . Inspeccionando las ecuaciones (2) y (3) se concluye que no es posible estimar los valores de las incógnitas restantes.

Por la evidencia anterior, con las direcciones consignadas en la Tabla 4.2 no es posible hallar el estado de esfuerzos deseado.

Por lo tanto, las direcciones de medición en los Grupos de instrumentos ubicados en las elevaciones superiores (mayores de la 302), se cambiaron a las siguientes:

CELIDAS	COSENO DE DIRECCIONES		
	i	j	k
$C_x$	0	0	1
$C_y$	1	0	0
$C_z$	0	1	0
$C_{x45}$	$-1/\sqrt{2}$	0	$1/\sqrt{2}$
$C_{y45}$	0	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
$C_{z45}$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0

Las ecuaciones que permiten el cálculo de las incógnitas son:

$$T_{xx} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sigma_{x.d.s.}$$

$$T_{yy} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sigma_{y.d.s.}$$

$$T_{yx} = \sigma_{x.d.s.} - \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2}$$

## REFERENCIAS

- (1) Kondner, R. L. ( 1963 ) " Hyperbolic stress-strain Response: Cohesive Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 89, No SM1, February, 1963, pp. 115-143
- (2) Kondner, R. L., and Zelasko, J. S. ( 1963 ) " A Hyperbolic stress-strain formulation for sands," Proceedings, 2 nd Pan - American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, Rio de Janeiro, pp. 289-324
- (3) Kondner, R. L. and Zelasko, J. S. ( 1963 ) " Void ratio effects on the Hyperbolic stress-strain Response of a sand," STP 361 Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, 1963, pp. 250-257
- (4) Janbu, H. ( 1963 ) " Soil Compressibility as determined by Oedometer and Triaxial Test," Proceedings, European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol, 1, Weisbaden, pp. 19-25
- (5) Kulhawy, F. H., Duncan, J. M. and Seed, H. B., ( 1969 ) " Finite Element Analyses of stresses and movements in embankments during construction," Report No EE-69-4, Department of Civil Engineering, University of California- Berkeley
- (6) Alberro, J., Fujigaki, J., y Arenas, A. ( 1976 ) " Análisis del estado de esfuerzos y deformaciones de la presa Chicoasén," Informe presentado a la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM
- (7) León, J. L., Magaña, R. y Alberro, J. ( 1976 ) " Análisis tri dimensional de la presa Chicoasén", Informe presentado a la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM
- (8) León, J. L., Magaña, R. y Alberro, J. ( 1977 ) " Análisis tri dimensional de la presa Chicoasén - Segunda parte," Informe presentado a la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM
- (9) Marsal, R. J. y Moreno, E. ( 1979 ) " Investigaciones sobre el diseño y comportamiento durante construcción de la presa Chicoasén, México," Contribución al XIII Congreso Internacional de Grandes Presas, H. Delhi .
- (10) Alberro, J. " Deformabilidad de los materiales del núcleo de la presa Chicoasén," Informe a la Comisión Federal de Electricidad, Marzo, 1979
- (11) SEM, CFE, y UNAM, " Comportamiento de presas construidas en México," Contribución al XIII Congreso Internacional de Grandes Presas, México, 1979

- (12) Marsal, R. J. y Ramírez de Arellano, L. ( 1965 ), " Presa el Infiernillo, Observaciones en la cortina durante el período de Construcción y primer llenado del Embalse". Publicación de La Comisión Federal de Electricidad, México
- (13) Silva E., C. ( 1977 ) " A high Sensitivity Piezometer", Memorias del VIII Congreso Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Sesión especial I, Vol. 4, Moscú, URSS
- (14) Rosati, E. ( 1979 ) " Determinación del Módulo tangente de deformación basada en información obtenida de Instrumentos de medición," Memorias del VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Lima, Perú, pp. 531-540.