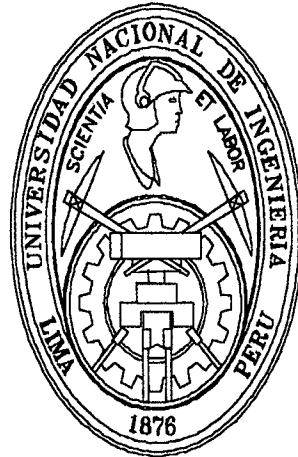


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**

**TESIS**

**Para optar Título Profesional de  
INGENIERO CIVIL**

**YESIL YOTNER SILVA ESPINOZA**

**LIMA – PERU**

**2004**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

A Dios por su bendición y haberme  
dado la claridad de mantenerme firme  
en mis convicciones.

A mi Madre por su sacrificio, aliento y  
paciencia inagotable.

## **Agradecimiento**

Mi agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de la presente tesis a los que contribuyeron en hacer realidad este trabajo.

Mi agradecimiento al Dr. Jorge Alva Hurtado quien fue mi asesor y guía, en el desarrollo y culminación satisfactoria de la Tesis.

Mi reconocimiento a las personas que me apoyaron directa o indirectamente, al grupo humano tan importante y unido del Laboratorio Geotécnico del CISMID-UNI. Al Dr. Zenón Aguilar y a todo el personal entre Ingenieros, Bachilleres y técnicos y administrativo que me brindaron su amistad y apoyo durante el desarrollo de mi Tesis.

A mis compañeros de trabajo de la empresa Hidroenergía S.R.L por su aliento constante.

Finalmente un agradecimiento muy especial a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional para cumplir con el objetivo tan anhelado.

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de tesis cuyo título es “INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA” se recoge los conocimientos desarrollados respecto al fenómeno de infiltración, aplica estos conceptos al modelamiento matemático de dicho fenómeno y compara los resultados con auscultaciones de la instrumentación geotécnica. A continuación se presenta un resumen del contenido de cada capítulo del trabajo desarrollado.

### **CAPITULO 1:**

Se hace una introducción, con la intención de dar los lineamientos generales seguidos para el desarrollo del trabajo de tesis.

### **CAPITULO 2:**

En este capítulo se presentan los conceptos básicos que rigen el flujo de fluidos a través de una masa de suelo, con la finalidad de entender el fenómeno y las consideraciones que se tienen para el análisis, además se plantean las leyes matemáticas que rigen este fenómeno.

### **CAPITULO 3:**

En este capítulo se presenta la metodología y los conceptos para determinar la filtración a través del cuerpo y la fundación de una presa de tierra, además se expone la importancia del drenaje de ésta, los criterios de diseño para proyectar filtros y la importancia del núcleo como barrera impermeable. También se exponen los principales problemas que se generan a causa de la infiltración en estructuras de almacenamiento construidas en base a materiales provenientes de depósitos naturales .

### **CAPITULO 4:**

Presenta los criterios generales del método de elementos finitos y su aplicación en el modelamiento del fenómeno de infiltración en estructuras de tierra. Para esto se



presentan los criterios para realizar la discretización de la estructura en elementos pequeños que permitan la representación del fenómeno físico y las ecuaciones matemáticas desarrolladas para su cálculo.

#### **CAPITULO 5:**

En este capítulo se presentan los resultados de un análisis de infiltración en modelo matemático realizado en la Presa Principal Tinajones, para el cual se ha utilizado programas de cómputo como ELF y SEEP/W que utilizan el método de elementos finitos para realizar el modelamiento. Además, se presentan los resultados del procesamiento de las lecturas de los 60 piezómetros eléctricos instalados en las secciones 0+350, 0+850 y 1+850 de la presa principal Tinajones y las variaciones de las alturas piezométricas en función del nivel de embalse. También se presentan la exploración geotécnica ejecutada y los resultados de laboratorio.

#### **CAPITULO 6:**

Se presentan las consideraciones más relevantes para realizar un análisis de estabilidad, se describen los principales métodos de análisis y se presentan los resultados del análisis de estabilidad de taludes en condiciones estáticas y pseudoestáticas realizados en la Presa Principal Tinajones. El objeto de dicho análisis de estabilidad fue determinar las causas de los deslizamientos ocurridos en el talud aguas arriba de la Presa como consecuencia de las altas precipitaciones, que se presentaron a causa del fenómeno El Niño. También se presenta el esquema de rehabilitación propuesto.

#### **CAPITULO 7:**

Finalmente se presentan las conclusiones y principales recomendaciones obtenidas del trabajo de tesis desarrollado.

# INDICE

	PAG.
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>001</b>
<b>CAPITULO 2: INFILTRACIÓN</b>	<b>003</b>
2.1 INTRODUCCION	003
2.2 EL AGUA EN EL SUELO	003
2.3 CONCEPTO DE ESFUERZO EFECTIVO	003
2.3.1 Esfuerzos en el Terreno	004
2.3.2 Esfuerzo Efectivo	006
2.4 FLUJO UNIDIMENSIONAL	006
2.4.1 Ley de Darcy	007
2.4.1.1 Validez de la Ley de Darcy	009
2.4.1.2 Velocidad de Flujo	010
2.4.1.3 Carga de Agua	012
2.4.2 Piezómetros	013
2.4.2.1 Medida de la Presión Intersticial en el Laboratorio	013
2.4.2.2 Medida de Presiones Intersticiales en el Terreno	013
2.5 FLUJO BIDIMENSIONAL	014
2.5.1 Ecuación Fundamental del Flujo de Agua en un Suelo	014
2.5.2 Redes de Flujo	019
2.6 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS	020
2.6.1 Importancia de la Permeabilidad	021
2.6.2 Calculo de la Permeabilidad	021

2.6.3	Factores que Influyen sobre la Permeabilidad	023
2.6.3.1	Fluido Filtrante	024
2.6.3.2	Tipo de Suelo	024
2.7	CAPILARIDAD	025
2.8	FUERZA DE FILTRACION	027
<b>CAPITULO 3: FILTRACION Y DRENAJE EN PRESAS DE MATERIAL SUELTO</b>		<b>029</b>
3.1	INTRODUCCION	030
3.2	PRESAS DE MATERIAL SUELTO	030
3.3	FILTRACION	031
3.3.1	Casos Singulares de Red de Corriente	032
3.3.2	Línea de Saturación	036
3.3.3	Trazado Manual de la Red de Flujo	040
3.3.4	Medios Anisótropos	041
3.3.5	Métodos Numéricos para el Cálculo de la Red de Flujo	042
3.3.6	Modelos Analógicos	043
3.3.7	Estimación de las Presiones y del Caudal	045
3.3.8	Influencia de la Capilaridad	045
3.4	DRENAJE	046
3.4.1	Espaldón Permeable	046
3.4.2	Capa Drenante	048
3.5	IMPERMEABILIZACION DEL SUELO DE FUNDACIÓN	051
3.5.1	Pantallas de Impermeabilización de la Fundación	051
3.5.1.1	Tablestacas	052

3.5.1.2	Pilotes Secantes	052
3.5.1.3	Trinchera de Lodos	053
3.5.1.4	Cortina o Pantalla Inyectada	053
3.5.2	Pantallas Incompletas	054
3.5.3	Zampeados de Impermeabilización(blanket)	054
3.6	CAUDAL FILTRADO POR LA FUNDACIÓN	057
3.7	NUCLEOS Y FILTROS	058
3.7.1	Erosión Interna( Sifonamiento y Sifusión)	059
3.7.2	Fisuración de Núcleos	064
3.7.2.1	Fisuras Transversales	065
3.7.2.2	Fisuras Longitudinales, Verticales o Subverticales	066
3.7.2.3	Fisuras Interiores, Horizontales y Verticales	067
3.7.3	Precauciones Contra la Fisuración	069
3.7.4	La Fracturación Hidráulica	070
3.8	FILTROS	072
3.8.1	Antecedentes	072
3.8.2	Principios Generales	074
3.8.3	Ensayos en Laboratorio	077
3.8.4	Normas para el Proyecto de Filtros	078
3.8.5	Estabilidad Interna del Filtro (Autoestabilidad)	081
3.8.6	Ensayos en Obra	082
3.8.7	Espesor de los Filtros	083
3.8.8	Franja de Arena Aguas Arriba del Núcleo	083
3.8.9	Compactación de los Filtros	084
3.8.10	Filtros Sintéticos	084

<b>CAPITULO 4: ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>086</b>
4.1 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	086
4.1.1 Introducción	086
4.1.2 Desarrollo del Método de los Elementos Finitos	086
4.1.3 Planteamiento del Método	087
4.1.3.1 Descripción	087
4.1.3.2 Mallado	087
4.1.3.3 Performance del Método	088
4.2 FUNCIÓN VOLUMETRICA (contenido de agua)	089
4.3 FUNCIÓN DE CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA	091
4.3.1 Cálculo de la Conductibilidad Hidráulica	092
4.4 LEY DE FLUJO	093
4.4.1 Ecuaciones que Gobiernan el Flujo	093
4.4.2 Sistema de Coordenadas	096
4.4.3 Funciones de Interpolación	099
4.4.4 Modelo de las Variables de Campo	100
4.4.4 Derivada de la Función de Interpolación	101
4.5 ECUACIONES DE ELEMENTOS FINITOS	105
4.5.1 Integración en Función del Tiempo	107
4.5.2 Integración Numérica	108
4.5.3 Matriz de Conductibilidad Hidráulica	112
4.5.4 Matriz de Masa	113
4.4.5 Límite de Flujo	114
4.6 ALMACENAMIENTO DE LAS ECUACIONES	117
4.7 SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES	117

4.7.1	Gradientes y Velocidades	119
4.7.2	Cantidad de Flujo	120
4.8	ELEMENTOS INFINITOS	123
4.8.1	Funciones Utilizadas	123
4.8.2	Definición del Polo	124
<b>CAPITULO 5: APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO EN EL</b>		<b>128</b>
<b>ANALISIS DE INFILTRACION DE LA PRESA PRINCIPAL TINAJONES</b>		
5.1	INTRODUCCIÓN	128
5.2	ANTECEDENTES	128
5.3	DESCRIPCIÓN DE LA PRESA TINAJONES	129
5.3.1	Ubicación	129
5.3.2	Características	129
5.3.3	Descripción	130
5.3.3.1	Núcleo	130
5.3.3.2	Cuerpo de la Presa	131
5.4	ESTADO DE LA PRESA Y DIQUES DURANTE LA EXPLOTACIÓN	131
5.4.1	Problema de Fisuramiento	132
5.4.2	Causas de las Fisuras	133
5.4.2.1	Causa de El Niño – Eventos Hidrológicos	134
5.4.2.2	Causa de Asentamiento	134
5.4.3	Tipos de Fisuras y Grietas	135
5.4.3.1	Fisuras Continuas	135
5.4.3.2	Fisuras Abiertas por Empuje y Agrietamientos Lavados	136

5.4.3.3	Fisuras de Contracción	136
5.5	HIDROLOGIA	137
5.5.1	La Cuenca	137
5.6	EXPLORACION GEOTECNICA	139
5.6.1	Trincharas	139
5.6.1.1	Trinchera T-1 (Km 0+351.50)	139
5.6.1.2	Trinchera T-2 (Km 0+851)	140
5.6.1.3	Trinchera T-3 (Km 1+196.40)	140
5.6.1.4	Trinchera T-4 (Km 1+502.55)	141
5.6.1.5	Trinchera T-5 (Km 1+819)	142
5.6.1.6	Trinchera T-6 (Km 1+985)	142
5.6.1.6	Trinchera T-8 (Km 1+350.30)	143
5.6.1.7	Trinchera T-9 (Km 1+930)	143
5.6.2	Perforaciones Diamantinas	144
5.6.3	Exploración Geofísica	146
5.6.3.1	Penetración del Terreno por Radar (GPR)	146
5.6.3.2	Resistividad Geoeléctrica	146
5.6.3.2.1	Trabajo de Campo y Gabinete	146
5.6.3.2.2	Resultados	147
5.7	SISMICIDAD	147
5.7.1	Marco Sísmico Tectónico	147
5.7.2	Amenaza Sísmica	148
5.7.3	Determinación del Coeficiente Sísmico	149
5.8	INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN LA PRESA TINAJONES	149
5.8.1	Piezómetros	149
5.8.2	Vertederos de Aforos	150
5.8.3	Placas para el Control de Asentamiento	151

5.9	AUSCULTACION DE LA INSTRUMENTACION INSTALADA	151
5.9.1	Control de Asentamiento	151
5.9.2	Auscultación de Piezómetros	152
5.9.2.1	Obtención de Datos	152
5.9.2.2	Procesamiento de Datos	152
5.9.2.3	Análisis de Resultados	153
5.10	ANALISIS DE FILTRACION EN LA PRESA TINAJONES	154
5.10.1	Programa de Elementos Finitos SEEP/W	154
5.10.1.1	Parámetros Utilizados	155
5.10.1.2	Análisis de Resultados	155
5.10.2	Programa de Elementos Finitos ELF	155
5.10.2.1	Procedimiento de Cálculo	156
5.10.2.2	Parámetros Utilizados	156
5.10.2.3	Análisis de Resultados	157
5.11	Comparación de los Resultados Teóricos con la Lectura de los Piezómetros	158
<b>CAPITULO 6: INFLUENCIA DE LA INFILTRACION EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA PRESA TINAJONES</b>		<b>159</b>
6.1	INTRODUCCION	159
6.2	ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE MATERIAL SUELTO	159
6.2.1	Consideraciones Básicas para el Diseño	159
6.2.1.1	Propiedades de los Materiales	160
6.2.1.2	Otros Factores	161
6.2.1.3	Información Geológica	161
6.2.1.4	Resultados del Análisis de Estabilidad de Taludes	161



6.2.2	Condiciones de Comportamiento Inadecuado	162
6.2.2.1	Falla por Corte	162
6.2.2.2	Deformación Excesiva	162
6.2.2.3	Licuefacción	163
6.2.3	Problemas Especiales	163
6.2.3.1	Falla Progresiva	163
6.3	CONDICIONES DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	164
6.3.1	Análisis de Estabilidad Estática	164
6.3.2	Análisis de Estabilidad Dinámica	164
6.3.2.1	Análisis de Estabilidad Pseudo Estático	165
6.4	ESTABILIDAD EN PRESAS Y TERRAPLENES	165
6.4.1	Estado Final de la Construcción	166
6.4.2	Estabilidad de los Taludes en un Estado de Infiltración Constante	167
6.4.3	Desembalse Rápido	167
6.4.3.1	El Tiempo de Consolidación Mucho Mayor que el Tiempo de Vaciado	169
6.4.3.2	Tiempo de Consolidación Mucho Menor que el Tiempo de Vaciado	169
6.5	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	171
6.5.1	Breve Resumen Histórico y Tendencias Actuales	171
6.5.2	Elección de la Superficie de Deslizamiento	173
6.5.3	Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes	175
6.5.4	Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Equilibrio Limite	177
6.5.4.1	Elección del Mecanismo de Falla	178
6.6	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PRESA PRINCIPAL TINAJONES	178
6.6.1	Análisis de Estabilidad a Largo Plazo	178

6.6.1.1	Parámetros de los Materiales	179
6.6.1.2	Análisis de Resultados	180
6.6.2	Análisis de Estabilidad a Corto Plazo	181
6.6.2.1	Estabilidad Durante el Fenómeno de El Niño	182
6.6.2.2	Estabilidad a Corto Plazo Caso del Filtro Ocluido	183
6.6.2.3	Estabilidad a Corto Plazo( Llenado de las Grietas del Núcleo)	183
6.6.2.4	Análisis de Resultados	183
6.6.3	Esquema de Rehabilitación Propuesto	185
<b>CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>187</b>
7.1	CONCLUSIONES	187
7.2	RECOMENDACIONES	192
<b>REFERENCIAS</b>		<b>193</b>
<b>PANEL FOTOGRAFICO</b>		
<b>LAMINAS</b>		
<b>ANEXO A: AUSCULTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN</b>		
<b>ANEXO B: ANÁLISIS DE INFILTRACION</b>		
<b>ANEXO C: ESTABILIDAD DE TALUDES</b>		
<b>ANEXO D: ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO</b>		

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

El fenómeno de infiltración del agua a través de estructuras de tierra tiene tres problemas importantes que son; la pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar o subsanar, se genera un estado de presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso y el paso del agua a través de las zonas con materiales finos el cual tiende a arrastrar esas partículas, con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva. Es por eso que la teoría de escurrimiento o infiltración a través del cuerpo de una estructura de tierra se basa en las condiciones de frontera, que se le asigna con la finalidad de reproducir el fenómeno en mención.

Después de las lluvias extraordinarias de 1983, la Presa Principal Tinajones sufrió una serie de problemas como asentamientos diferenciales, la aparición de grietas en la corona y en varias zonas de los espaldones se desarrollaban presiones de poro mas altas que las debidas al nivel freático.

El presente trabajo de tesis ha sido aplicado al análisis de infiltración de la Presa principal Tinajones, con el propósito de determinar las causas de dichas deficiencias. Cabe mencionar que esta presa fue diseñada y construida hace mas de 30 años, en esa época para su diseño no se contaba con las herramientas computacionales que existen en la actualidad, para realizar el modelamiento matemático de su comportamiento frente a fenómenos como la infiltración.

En los últimos años la existencia y rápido desarrollo de la capacidad de ordenadores matemáticos ha permitido dar un enfoque numérico a diversos problemas de ingeniería mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos. Este método permite hacer un modelo matemático con el cual se puede reproducir todos los detalles deseados de una estructura. El modelo matemático no suplanta al mecánico; ambos métodos se complementan mutuamente en casos importantes. Pero en gran parte de problemas es suficiente el modelo matemático, que es en principio más sencillo y económico y que tiene la gran ventaja de que una vez programado, dispone de una gran flexibilidad para hacer múltiples modificaciones e incluso un cambio de hipótesis.

Si el suelo se encuentra húmedo, existen dentro del suelo resistencias aparentes, debido a las presiones de poro negativas, que pueden producir un talud estable, pero si se produce saturación por infiltración desaparecen, produciendo la falla por la disminución de las fuerzas resistentes. En zonas secas las presiones negativas asociadas con la humedad alcanzan valores importantes y determinantes en la estabilidad de los taludes. En el caso de la Presa Tinajones se observa la relación existente entre el periodo de máximas precipitaciones y la aparición de los deslizamientos en el talud aguas arriba del dique principal.

## **CAPITULO 2**

### **INFILTRACION**

#### **2.1 INTRODUCCION**

En este capitulo se presentan los conceptos básicos que rigen el flujo de fluidos a través de una masa de suelo, con la finalidad de entender el fenómeno y las consideraciones que se tienen para el análisis.

#### **2.2 EL AGUA EN EL SUELO**

Una de las consideraciones más importantes en el estudio de la mecánica de suelos es el estudio de los efectos del agua sobre las propiedades ingenieriles del suelo. Los ensayos de limites de Atterberg señalan cómo una masa de suelo puede variar de sólido a fluido viscoso.

El agua intersticial influye sobre el comportamiento del suelo de dos maneras, una modificando la forma en que las partículas de suelo se asocian para formar el esqueleto mineral (interacción química) y otra influyendo sobre la magnitud de las fuerzas transmitidas a través de dicho esqueleto (interacción física).

En el estudio de la infiltración del agua en una masa de suelo se consideran específicamente los casos en que las presiones intersticiales vienen determinadas por las presiones que existen en los contornos de dicha masa de suelo, éstas son independientes de las cargas aplicadas.

#### **2.3 CONCEPTO DE ESFUERZO EFECTIVO**

El comportamiento de una masa de suelo depende de la diferencia entre el esfuerzo total y la presión intersticial, a dicho esfuerzo resultante se le denomina

esfuerzo efectivo, que es uno de los conceptos fundamentales de la Mecánica de Suelos.

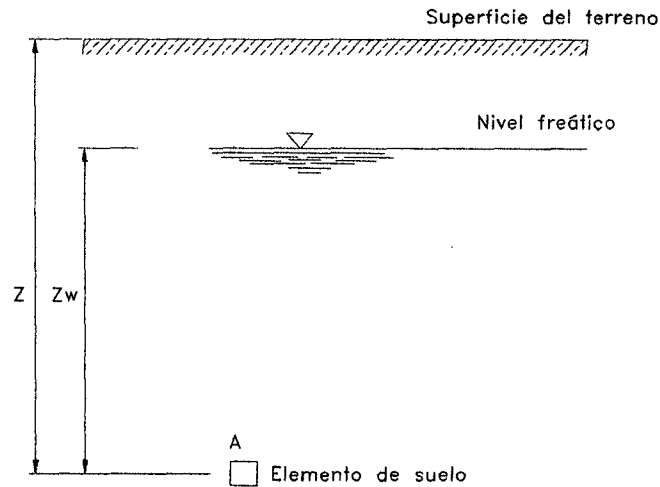
### 2.3.1 Esfuerzos en el Terreno

Las ecuaciones planteadas por Terzaghi para determinar las presiones geoestáticas en un suelo seco, pueden ser utilizadas para calcular la presión geoestática vertical total que ejerce el suelo húmedo a una profundidad determinada, el peso específico que contribuye a dicha presión es el peso específico total. En la Figura 2.1 se muestra un terreno donde existe un nivel freático, el cual nos indica que la porción de suelo que se encuentra por debajo de dicho nivel se encuentra saturado. Las ecuaciones propuestas por Terzaghi para determinar esfuerzos geoestáticos totales se transforman en:

$$\sigma_v = z\gamma_t \quad (2.1)$$

$$\sigma_v = \int_0^z \gamma_t dz \quad (2.2)$$

$$\sigma_v = \sum \gamma_t dz \quad (2.3)$$



**Figura 2.1: Esfuerzos en el terreno**

En la Figura 2.1 se muestra un suelo saturado con agua estática. El nivel para el cual la presión del agua intersticial es la atmosférica, es decir presión manométrica nula, se denomina nivel freático. El punto A se encuentra a una profundidad  $Z_w$  en donde existen además de las presiones o esfuerzos  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  existen también las presiones de agua vertical  $\mu_v$  y horizontal  $\mu_h$ . Como  $\mu_v$  y  $\mu_h$  se miden al mismo nivel en un elemento infinitamente pequeño y como el agua no puede soportar esfuerzos de corte estático tenemos.

$$\mu_v = \mu_h = \mu \quad (2.4)$$

$$\mu = Z_w \gamma_w \quad (2.5)$$

Donde:

$\mu$  Presión intersticial.

$Z_w$  Profundidad

$\gamma$  Peso específico total del suelo

### 2.3.2 Esfuerzo Efectivo

En un plano cualquiera que pasa por el punto A del terreno (Figura 2.1) existe un esfuerzo total  $\sigma$  y una presión intersticial o de poro  $\mu$ . Definimos ahora a la presión efectiva como el valor del esfuerzo total  $\sigma$  menos la presión intersticial  $\mu$ . La definición de esfuerzo efectivo se expresa en la ecuación 2.6

$$\bar{\sigma} = \sigma - \mu \quad (2.6)$$

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_v - \mu \quad (2.7)$$

$$\bar{\sigma}_h = \sigma_h - \mu \quad (2.8)$$

Donde:

$\bar{\sigma}$  Esfuerzo efectivo total

$\bar{\sigma}_v$  Esfuerzo efectivo vertical

$\bar{\sigma}_h$  Esfuerzo efectivo horizontal

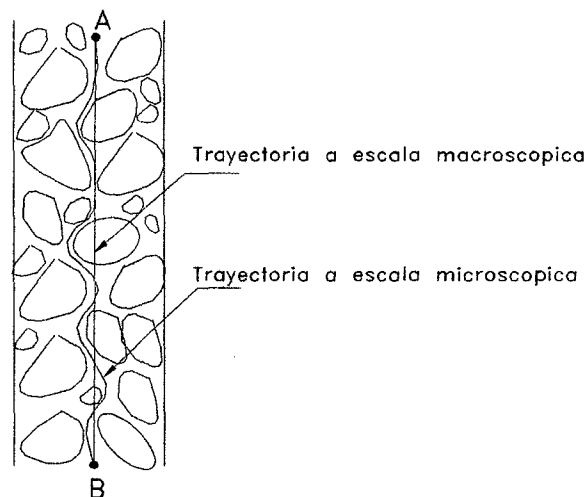
## 2.4 FLUJO UNIDIMENSIONAL

Es importante conocer los principios del flujo de fluidos a través del suelo, principalmente del agua para resolver problemas concernientes a:

- La velocidad con que el agua fluye a través del suelo para determinar, por ejemplo, el caudal de agua que fuga a través de una presa de tierra.
- Consolidación para calcular la velocidad de asentamiento de una cimentación
- La resistencia para el cálculo de los factores de seguridad de un terraplén.



En general los poros del suelo están conectados entre si. En los suelos gruesos, gravas, arenas e incluso limos es difícil imaginar poros aislados, en las arcillas formadas habitualmente por partículas aplanadas, podría existir un pequeño porcentaje de huecos aislados. Como los poros están interconectados el agua puede fluir a través de suelos naturales compactos. Así por ejemplo en una columna de suelo como se muestra en la Figura 2.2 el agua puede circular del punto A al B. Realmente el agua no sigue un camino en línea recta sino un camino ondulado de un poro a otro. La velocidad del agua que fluye a través de un suelo depende del tamaño del poro y de su posición en el mismo. Sin embargo en problemas de ingeniería puede considerarse que el agua fluye del punto A al B según una línea recta con una determinada velocidad efectiva.



**Figura 2.2: Trayectoria del flujo de agua en un suelo**

#### 2.4.1 Ley de Darcy

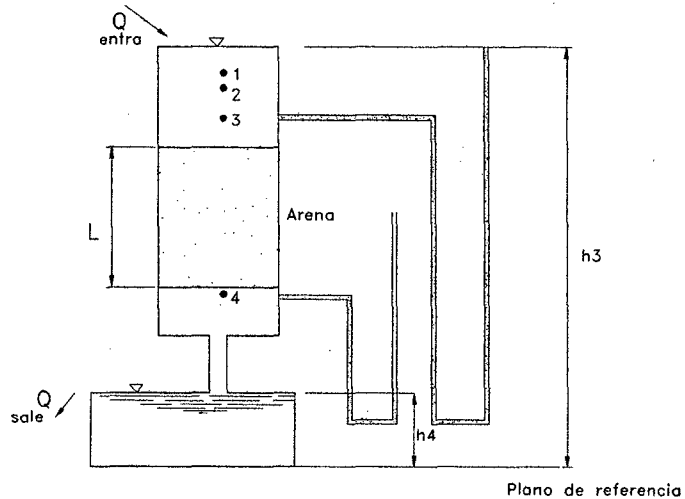
Aproximadamente en 1850 H. Darcy en la ciudad de París, realizó un experimento clásico. Utilizó un dispositivo semejante al que aparece en la Figura 2.3 para estudiar las propiedades del flujo de agua a través de un lecho filtrante de arenas. Hizo variar la longitud de la muestra  $L$  y la presión de agua en la parte superior e inferior de la muestra, midiendo luego el gasto  $Q$  a través de la arena.

Darcy encontró experimentalmente que  $Q$  era proporcional a  $(h_3-h_4)/L$  multiplicado por el área de la sección.

$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A = kiA \quad (2.9)$$

Donde:

- Q Gasto (descarga)
- k Constante conocida como coeficiente de permeabilidad de Darcy.
- $h_3$  Altura sobre el plano de referencia en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante.
- $h_4$  Altura sobre el plano de referencia que alcanza el agua a la salida de la capa filtrante.
- L Longitud de la muestra
- A Área total interior de la sección transversal del recipiente que contiene la muestra.
- i Gradiente hidráulico



**Figura 2.3: Experimento de Darcy**

#### 2.4.1.1 Validez de la Ley de Darcy

Estudiando el flujo de agua por tuberías, Reynolds encontró una velocidad crítica  $V_c$  que expresó en función del llamado número de Reynolds  $R$ , como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R = \frac{v_c D \gamma_w}{\mu g} \quad (2.10)$$

Donde:

$D$  : Diámetro del tubo

$\gamma_w$  : Peso específico del agua

$\mu$  : Viscosidad del agua

$g$  : Aceleración de la gravedad

Muchos investigadores han intentado utilizar el concepto del número de Reynolds para determinar el límite superior de la validez de la Ley de Darcy. Tales trabajos han sido comentados por Muskat (1946) y Scheidegger (1957). En los suelos se toma como diámetro  $D$  el diámetro medio de las partículas o el diámetro medio de los poros. Los valores de  $R$  para los cuales el flujo en medios porosos se hace

turbulento, puede variar desde 0.1 hasta 75. Scheidegger encuentra como principal razón por la que los medios porosos no presentan un número de Reynolds crítico y definido es que el suelo no puede representarse como un conjunto de tubos rectos.

El valor de  $D$  para el cual el número de Reynolds toma el valor de 1.0 es aproximadamente 0.5 mm, es decir una gama de arenas gruesas. La arena gruesa parece ser el suelo más permeable por el cual se produce flujo en régimen laminar. Existe cierta evidencia experimental que indica que en suelos de baja permeabilidad, puede requerirse un gradiente hidráulico de hasta 20 ó 30 para que se inicie el flujo. Scheidegger (1957) comenta varias razones por las cuales el flujo a través de aberturas muy pequeñas puede no seguir la Ley de Darcy.

Una evidencia abrumadora muestra que la Ley de Darcy se cumple en suelos desde el tamaño de los limos al de las arenas medias. Lo mismo puede decirse de la filtración en régimen establecido a través de arcillas. Para suelos de mayor permeabilidad que la arena media debería determinarse experimentalmente la relación que existe entre el gradiente y la velocidad para cada suelo.

#### 2.4.1.2 Velocidad de Flujo

Considerando la velocidad a la que una gota de agua se mueve al filtrarse a través de un suelo se puede comprender el flujo de un fluido. La ecuación 2.9 puede escribirse como:

$$\frac{Q}{A} = ki = v \quad (2.10)$$

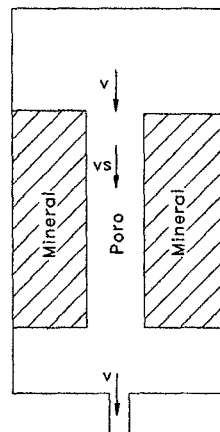
Como  $A$  es el área del recipiente en la parte situada por encima del suelo (Figura 2.1),  $v$  es la velocidad de movimiento descendente de la gota de agua desde la posición 1 a la 2. Esta velocidad es numéricamente igual a  $ki$ ; por tanto,  $k$  puede

interpretarse como la velocidad de descarga para un gradiente unitario, Es decir  $k=v/i$  ó  $k=v$  para un gradiente igual a 1.0.

De la posición 3 a la 4 (Figura 2.3), una gota de agua fluye a mayor velocidad que de la posición 1 a la 2 ya que el área media de los canales de flujo es más pequeña. Esta área es representada en la Figura 2.4 que es el mismo dispositivo que la Figura 2.3 separando las partes de mineral y poro. Mediante el principio de continuidad podemos relacionar la velocidad de descarga  $v$  con la velocidad efectiva media de flujo a través del suelo  $V_s$  de la siguiente forma:

$$Q = vA = v_s A_v \quad (2.11)$$

$$v_s = v \frac{A}{A_v} = v \frac{AL}{A_v L} = v \frac{V}{V_v} = \frac{v}{n} \quad (2.12)$$



**Figura 2.4: Canal de flujo**

La velocidad media de flujo a través del suelo  $V_s$  denominada velocidad de filtración es por tanto igual a la velocidad de descarga dividida por la porosidad.

$$v_s = \frac{v}{n} = \frac{ki}{n} \quad (2.13)$$

La ecuación 2.12 es la velocidad media de una gota de agua al desplazarse desde el punto 3 al punto 4 ; ésta es la distancia en línea recta que existe entre los punto 3 y 4, dividida entre el tiempo que demora en recorrer el camino 3-4.  $V_s$  es una

velocidad ficticia asumiendo que la gota de agua recorre un camino en línea recta.

### 2.4.1.3 Carga de Agua

En el estudio de flujo de fluidos es conveniente expresar la energía potencial y cinética en términos de alturas de agua, correspondientes a la energía por unidad de masa. En los problemas de flujo de fluidos a través de un suelo deben considerarse tres cargas:

- Carga de presión,  $h_p$  = presión dividida por el peso específico del fluido.
- Carga de altura o geométrica,  $h_e$  = distancia a un plano de comparación.
- Carga total,  $h = h_p + h_e$  = suma de cargas

Al estudiar el flujo a través de tubos o canales abiertos, debemos considerar también la carga de velocidad, sin embargo en los suelos dicha carga se desprecia. Por lo tanto la carga de presión y la carga geométrica contribuyen al movimiento de un fluido a través de un suelo. En conclusión se llega a dos importantes principios:

- El flujo entre dos puntos cualesquiera sólo depende de la diferencia de carga total
- Puede elegirse un plano de referencia cualquiera para medir la carga de altura, la magnitud absoluta de estas cargas no tiene significado, lo que se considera es la diferencia de carga de altura el cual es independiente del plano de referencia.

## **2.4.2 Piezómetros**

Son instrumentos de gran importancia porque nos permiten cuantificar la carga de presión en un determinado punto, ya que de ella puede deducirse la presión intersticial que es necesaria para calcular la presión efectiva.

### **2.4.2.1 Medida de la Presión Intersticial en el Laboratorio**

La carga de presión o presión del agua en un punto de una masa de suelo, se obtiene mediante un instrumento denominado piezómetro. La Figura 2.5 muestra dos piezómetros sencillos. A la derecha de la columna de suelo existe un tubo o bureta conectado a una pieza porosa a mitad de altura en el suelo. A la izquierda del tubo existe un manómetro Bourdon normal conectado a la pieza porosa. Los piezómetros mostrados en la Figura 2.5 son de fundamento muy sencillo, tienen el inconveniente de necesitar que el agua del suelo penetre en los instrumentos para registrar lecturas. Si la lectura se realizara en suelos que presenten una permeabilidad alta el tiempo necesario para un estado de flujo sería corto, pero si el suelo fuese de baja permeabilidad como un limo o arcilla se requiere de un tiempo apreciable para que el agua penetre en el manómetro o la bureta.

### **2.4.2.2 Medida de Presiones Intersticiales en el Terreno**

La medida de las presiones intersticiales en campo se hace siguiendo los principios básicos del sistema de medida de dichas presiones en el laboratorio, utilizando para ello los piezómetros de campo. En la Figura 2.6 se muestra un piezómetro de Casagrande modificado. Este piezómetro fue desarrollado por A. Casagrande y está formado básicamente por una piedra cerámica porosa, colocada en una columna de arena limpia. Como el agua debe fluir desde la arena al tubo y subir por éste para que se registre un aumento en la presión

intersticial, se trata de un piezómetro de flujo. Este piezómetro requiere un tiempo de estabilización relativamente corto. En las obras de ingeniería, el piezómetro de Casagrande es utilizado ampliamente en la medida de presiones intersticiales in situ.

## **2.5 FLUJO BIDIMENSIONAL**

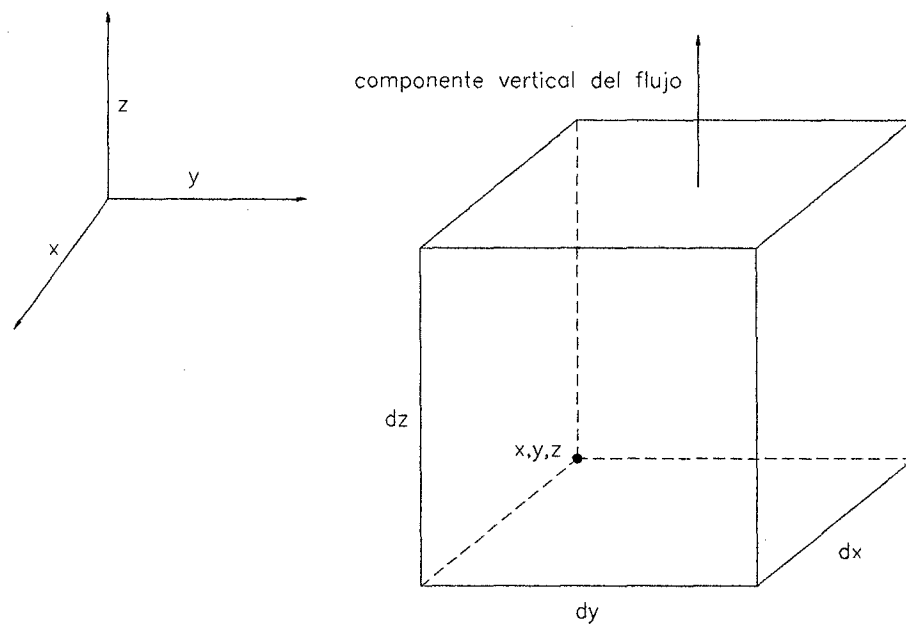
El análisis de filtración no es un procedimiento muy exacto, su cómputo es en la mayoría de los casos tan solo una estimación. Esta situación puede mejorarse parcialmente considerando un flujo establecido. El flujo establecido se obtiene cuando el suelo está saturado, existe un gradiente hidráulico sin cambio, se obtiene una masa de suelo y una velocidad de filtración constante. Solo consideramos el flujo en dos dimensiones (plano  $xy$ ), frecuentemente se considera un suelo homogéneo pero también se puede realizar el análisis para suelos anisotrópicos.

### **2.5.1 Ecuación Fundamental del Flujo de Agua en un Suelo**

La red de flujo concebida inicialmente en forma intuitiva con un fundamento teórico muy limitado, en esta sección se presentan las ecuaciones matemáticas que gobiernan el flujo de agua en el suelo, que nos sirve de base para la red de flujo y el cálculo de la filtración.

Consideramos un elemento de suelo, el cual se muestra en la Figura 2.5, a través del cual se produce el flujo laminar  $q$  con componentes en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :





**Figura 2.5: Flujo a través de un elemento de suelo**

$$q = q_x + q_y + q_z \quad (2.16)$$

Utilizando la ley de Darcy podemos escribir la expresión de la componente vertical del flujo  $q_z$ . Gasto entrante por la base del elemento,  $q_z = kiA$ , donde A es el área de la cara inferior.

$$q_z = k_z \left( -\frac{\partial h}{\partial z} \right) dy dx \quad (2.17)$$

Gasto saliente por la parte superior del elemento

$$q_z = \left( k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} \right) \left( -\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dy dx \quad (2.18)$$

donde

$k_z$  = permeabilidad en la dirección z, en el punto x,y,z

h = carga total.

El gasto neto que entra en el elemento debido al flujo vertical es:

$\Delta q_z$  = gasto entrante por la base – gasto saliente por la parte superior

$$\Delta q_z = k_z \left( -\frac{\partial h}{\partial z} \right) dydx - \left( k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} dz \right) \left( -\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dz \right) dydx \quad (2.19)$$

reduciendo la expresión anterior tenemos:

$$\Delta q_z = \left( k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial k_z}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial k_z}{\partial z} dz \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2.20)$$

Para el caso en que la permeabilidad se mantiene constante es decir  $\frac{\partial k_z}{\partial z} = 0$  la

expresión queda reducida a:

$$\Delta q_z = \left( k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2.21)$$

Utilizando el mismo criterio de deducción tenemos el gasto neto en la dirección

x:

$$\Delta q_x = \left( k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) dx dy dz \quad (2.22)$$

Para el caso de un flujo bidimensional se considera  $q_y=0$ . Entonces el gasto neto del flujo a través del elemento de suelo mostrado en la Figura 2.6 tenemos:

$$\Delta q = \Delta q_x + \Delta q_z = \left( k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) dx dy dz \quad (2.23)$$

El volumen de agua contenido en el elemento de suelo  $V_w$ .

$$v_w = \frac{Se}{1+e} dx dy dz \quad (2.24)$$

y la velocidad de variación del volumen de agua es:

$$\Delta q = \frac{\partial v_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Se}{1+e} dx dy dz \right) \quad (2.25)$$

Como  $dx dy dz/(1+e)$  es igual al volumen de las partículas sólidas y es constante

$$\Delta q = \frac{dx dy dz}{1+e} \frac{\partial (Se)}{\partial t} \quad (2.26)$$

Igualando las dos expresiones del gasto neto se obtiene:

$$\left( k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) dx dy dz = \frac{dx dy dz}{1+e} \frac{\partial (Se)}{\partial t} \quad (2.27)$$

El cual se reduce a:

$$k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{1+e} \left( e \frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (2.28)$$

Donde :

$S$  = Grado de saturación del elemento de suelo

$E$  = Relación de vacíos

La ecuación 2.28 es la ecuación básica del flujo laminar bidimensional en el suelo. Considerando los términos en  $e$  y  $S$  del miembro de la derecha de la ecuación podemos advertir cuatro tipos posibles de flujo.

- **Tipo 1:**  $e$  y  $S$  constantes
- **Tipo 2:**  $e$  variable y  $S$  constante.
- **Tipo 3:**  $e$  constante y  $S$  variable
- **Tipo 4:**  $e$  y  $S$  variables.

El tipo 1 es el flujo estacionario o establecido estudiado en este capítulo, mientras que los otros tipos son casos de flujo no establecido. El tipo 2 es de consolidación cuando  $e$  disminuye y de dilatación cuando  $e$  aumenta. El tipo 3 es de drenaje a volumen constante cuando  $S$  disminuye y de absorción cuando  $S$  aumenta. El tipo 4 comprende los casos de compresión y expansión. Los tipos 3 y 4 son casos complejos de flujo para los que no se han encontrado soluciones satisfactorias.

Para flujo establecido ( $e$  y  $S$  constantes) la ecuación 2.28 queda reducida a:

$$k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (2.29)$$

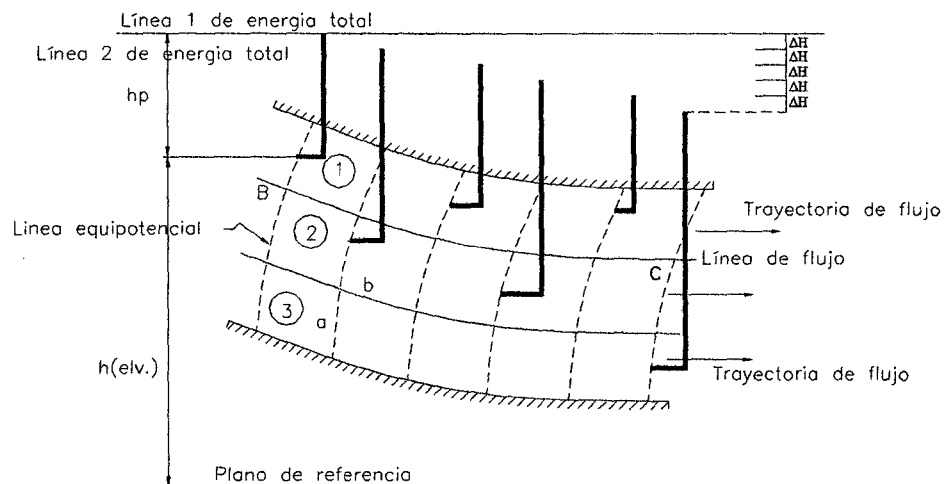
y cuando la permeabilidad es la misma en todas las direcciones ( $k_x=k_z$ ) la expresión se reduce a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (2.30)$$

La ecuación 2.30 es la ecuación de Laplace, la cual expresa que la variación de gradiente en la dirección  $x$  mas la variación del gradiente en la dirección  $z$  es nula. El hecho de que la ecuación del flujo en un medio isótropo satisfaga la ecuación de Laplace significa que las líneas de flujo son ortogonales a las líneas equipotenciales en una red de flujo.

### 2.5.2 Redes de Flujo

La Figura 2.6 representa una capa de suelo con un ancho unitario y confinada entre dos placas impermeables. El suelo se divide en secciones, dibujando una serie de líneas de flujo y líneas equipotenciales que se interceptan en ángulos rectos. El canal formado por dos líneas de flujo se llama trayectoria de flujo. La diferencia de energía, representada por dos líneas equipotenciales adyacentes es una pérdida de carga definida como  $\Delta h_i$  y es evidente que la pérdida de carga total entre dos puntos como B y C es  $5 \Delta h_i$ .



**Figura 2.6: Red de flujo en una masa de suelo**

Las dimensiones de los segmentos de la Figura 2.6 son  $a$  y  $b$  y con esto el área del elemento 1 a través del cual el agua fluye es:

$$A = a(l) \quad (2.31)$$

El área total de los tres tubos de flujo se obtiene como:

$$A_{total} = n_f(a) \quad (2.32)$$

Donde:

$n_f$  = número de tubos de flujo que puede ser un entero o un decimal

La longitud  $L$  del suelo a través del cual ocurre la pérdida de presión total constante  $h$  es:

$$L = n_d(b) \quad (2.33)$$

Donde:

$n_d$  = número de caídas equipotenciales (espacios) entre dos puntos de frontera y debe ser un entero ya que  $\Delta h_i$  es constante.

La cantidad de flujo por unidad de área puede calcularse mediante la siguiente formula

$$Q = kiA = k \frac{h}{L} A = k(h) \frac{n_f}{n_d} \frac{a}{b} \quad (2.34)$$

## 2.6 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS

La facilidad con que el agua fluye a través de un medio poroso es una propiedad de ingeniería denominada permeabilidad, en esta propiedad de ingeniería en los problemas de ingeniería geotécnica el fluido es el agua y el medio poroso es la masa de suelo. Cualquier material es poroso y si los poros están interconectados

posee permeabilidad. En consecuencia la roca, el concreto, el suelo y muchos otros materiales son porosos y permeables. Los materiales tales como la arcilla y limos en depósitos naturales tienen altos valores de porosidad pero son casi impermeables, principalmente debido al tamaño muy pequeño de los poros

### **2.6.1 Importancia de la Permeabilidad**

La permeabilidad en una masa de suelo es importante en:

- La evaluación de la cantidad de filtración a través o por debajo de presas diques, hacia pozos de agua.
- La evaluación de la subpresión o fuerzas de filtración bajo estructuras hidráulicas para un análisis de estabilidad.
- Provisión de un control de las velocidades de filtración, de tal manera que las partículas de grano fino no sean erosionadas de la masa de suelo.
- Rapidez de asentamiento en los que el cambio de volumen de suelo ocurre en la medida que el agua es expelida de los poros del suelo, como un proceso proporcional al gradiente de energía.

### **2.6.2 Cálculo de la Permeabilidad**

La permeabilidad de un suelo puede medirse en el laboratorio o en el mismo terreno, la determinación de la permeabilidad en laboratorio es mucho más fácil que hacerlo in situ, debido a que la permeabilidad depende mucho de la estructura del suelo. Debido a la difícil obtención de muestras de suelo representativas suele ser necesario realizar cálculos in situ de la permeabilidad. Sin embargo, la realización de las pruebas de laboratorio nos permiten estudiar la relación entre la permeabilidad y la relación de vacíos.

Entre los métodos utilizados en el laboratorio para determinar la permeabilidad de un suelo tenemos:

- Permeámetro de carga variable.
- Permeámetro de carga constante.
- La medida directa o indirecta mediante una prueba edométrica.

La prueba de carga variable sólo se aplica en suelos que tienen una permeabilidad muy alta y sólo es aplicable a suelos saturados. La prueba edométrica se realiza en suelos plásticos de baja permeabilidad. La prueba de permeabilidad con carga constante se utiliza ampliamente para todo tipo de suelos.

El coeficiente de permeabilidad para prueba de permeabilidad de carga variable se puede calcular a partir de la formula:

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_0)} \log_{10} \left( \frac{h_0}{h_1} \right) \quad (2.31)$$

Donde:

- $a$  = sección transversal de la bureta
- $L$  = longitud de la muestra de suelo en el permeámetro
- $A$  = sección transversal del permeámetro
- $t_0$  = instante en que el nivel de agua esta en  $h_0$
- $t_1$  = instante en que el nivel del agua esta en  $h_1$
- $h_0, h_1$  = alturas entre las que se determina la permeabilidad

La Figura 2.7 muestra los dispositivos para la prueba de permeabilidad de carga constante. El coeficiente de permeabilidad se deduce de la formula:



$$k = \frac{QL}{thA} \quad (2.32)$$

Donde:

$Q$  = caudal de agua que se filtra a través del suelo en un tiempo  $t$

$h$  = pérdida de carga

La permeabilidad es una propiedad que varía con la temperatura debido a que depende de la viscosidad del fluido, por lo tanto la permeabilidad a la temperatura  $T$  es  $k_T$ , lo cual puede deducirse a partir de la correspondiente a  $20^\circ\text{C}$ ,  $k_{20^\circ\text{C}}$  mediante la expresión:

$$k_{20^\circ\text{C}} = \frac{u_T}{u_{20^\circ\text{C}}} k_T \quad (2.33)$$

Donde:

$k_{20^\circ\text{C}}$  = Permeabilidad a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$

$u_T$  = Permeabilidad a la temperatura  $T$

$u_{20^\circ\text{C}}$  = Viscosidad del agua a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$

$u_T$  = Viscosidad del agua a la temperatura  $T$

### 2.6.3 Factores que Influyen Sobre la Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad que se utiliza en el cálculo de la velocidad de descarga de un fluido que se filtra a través de una sección de suelo, bajo un gradiente unidad. El valor de la permeabilidad depende de las características del fluido y del suelo. Una ecuación que refleja la influencia del fluido y de las características del suelo sobre la permeabilidad fue deducida por Taylor en 1948 a partir de la Ley de Poiseuille. Esta ecuación considera al flujo a través de los poros análogo al flujo en un sistema de tubos capilares.

$$k = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} C \quad (2.33)$$

En donde:

- $k$  = Coeficiente de permeabilidad de Darcy  
 $D_s$  = Diámetro efectivo de las partículas  
 $\gamma$  = Peso específico del fluido  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido  
 $e$  = Relación de vacíos  
 $C$  = Factor de forma

### 2.6.3.1 Fluido Filtrante

La ecuación 2.34 nos muestra que tanto la viscosidad como el peso específico del fluido tienen influencia sobre el valor de la permeabilidad. Estas dos características del fluido pueden eliminarse como variables definiendo una nueva permeabilidad específica o absoluta.

$$K = \frac{k\mu}{\gamma} \quad (2.35)$$

### 2.6.3.2 Tipo de Suelo

Las siguientes cinco características del suelo tienen influencia sobre el valor de la permeabilidad, estas características están estrechamente relacionadas y no se pueden aislar, en la ecuación 2.34 sólo se consideran el tamaño de las partículas y la relación de vacíos y las otras tres sólo se tratan indirectamente:

- Tamaño de las partículas
- Relación de vacíos

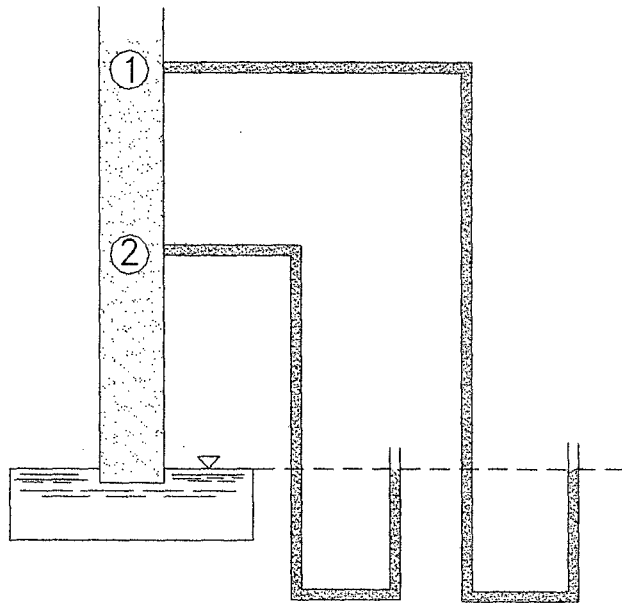
- Composición
- Estructura
- Grado de saturación

## 2.7 CAPILARIDAD

Existe una gran evidencia de que una superficie líquida resiste tensiones debido a la atracción superficial entre moléculas adyacentes. Esta atracción viene medida por la tensión superficial, una propiedad constante en cualquier líquido puro en contacto con otro líquido o con un gas a cierta temperatura. Un claro ejemplo de esta evidencia es el hecho que el agua puede ascender y mantenerse por encima del nivel de la presión atmosférica en un tubo muy fino o capilar. A este fenómeno se le denomina capilaridad.

La capilaridad permite que un suelo seco succione agua a niveles por encima del nivel freático, también da a lugar que un suelo drenante retenga agua por encima del nivel freático. La altura de columna de agua que un suelo puede mantener en esta forma se denomina altura o carga capilar y es inversamente proporcional al tamaño de los poros en el contacto aire-agua. Como cualquier suelo tiene un número infinito de poros también puede existir un número casi infinito de alturas capilares, en otras palabras la altura capilar para un determinado suelo depende del tamaño específico de los poros. La capilaridad queda especificada entre valores límites.

Un concepto esencial es que el agua capilar se encuentre a una presión absoluta menor que la presión atmosférica, es decir a una presión manométrica negativa. Para aclarar esto consideramos la Figura 2.8. En los puntos 1 y 2 se han colocado dos tubos piezométricos, en los extremos abiertos de ambos tubos el nivel de agua coincide con el nivel freático; por tanto la presión intersticial en el punto 1 es negativa y numéricamente igual a la distancia vertical entre el nivel freático y el punto 1 multiplicada por el peso específico del agua y la presión intersticial en el punto 2 es también negativa e igual a la distancia vertical entre el punto 2 y el nivel freático.



**Figura 2.8: Presiones en el agua capilar**

## 2.8 FUERZA DE FILTRACION

Cuando el agua fluye a través de los poros del suelo ejerce sobre las partículas sólidas una fuerza llamada de “fuerza de filtración”. Para cuantificar el valor de esta fuerza se considera un elemento de suelo de volumen  $\Delta V = \Delta L \times \Delta B$  limitado por las líneas equipotenciales AB y CD, y las líneas de flujo AC y BD.

Si hacemos una representación de las otras fuerzas de origen hidráulico que actúan sobre el elemento de suelo, las mismas que se muestran en la Figura 2.9. La fuerza resultante de este sistema es la fuerza de filtración y tiene una dirección perpendicular a las líneas equipotenciales (dirección del máximo gradiente).

La magnitud de la fuerza de filtración se determina por la siguiente relación.

$$J = (p_1 - p_2)\Delta B \quad (2.36)$$

Si  $\Delta L$  y  $\Delta B$  son pequeños se tiene que:

$$p_1 - p_2 = \Delta h \gamma_w \quad (2.37)$$

Donde  $\Delta h$  es la caída de potencial entre las equipotenciales AB y CD.

Por lo tanto la fuerza de filtración por unidad de volumen ejercida por el agua en la dirección de flujo es:

$$j = \frac{J}{\Delta V} = \frac{\Delta h}{\Delta L} \gamma_w = i_m \gamma_w \quad (2.38)$$

Donde  $i_m$  es el gradiente hidráulico máximo en el punto (gradiente hidráulico en la dirección normal a las líneas equipotenciales).

Las fuerzas de filtración son por lo tanto fuerzas de masa o de volumen. Si cierta porción de suelo de volumen  $V$  esta sometido a un flujo uniforme (esto es de gradiente constante en toda la masa) la fuerza de filtración es simplemente.

$$J = i_m \gamma_w V \tag{2.39}$$

Si el gradiente de la masa infiltrada es una función de punto, la fuerza de filtración es la suma vectorial en todos los elementos de volumen. Se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$J = \gamma_w \int \bar{i}_m dV \tag{2.40}$$

En los casos de zonas de flujo en que existe una superficie de salida horizontal como en la Figura 2.10 las fuerzas a que está sometido un elemento de suelo superficial, como abad de la figura son hacia abajo  $(\gamma_t - \gamma_w)V = \gamma'V$  en donde  $\gamma'$  es el peso volumétrico del suelo sumergido (hacia arriba).

Si el gradiente hidráulico máximo  $i_m$  fuese suficientemente grande, la fuerza dirigida hacia arriba podría igualar o superar el valor del peso sumergido del material lo que anularía los esfuerzos efectivos y por lo tanto la resistencia del suelo y este valor se llama gradiente crítico y vale:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \cong 1 \tag{2.41}$$

Cuando el valor del gradiente hidráulico máximo se aproxima al gradiente crítico se presenta la condición de arenas movedizas y de tubificación inminente.

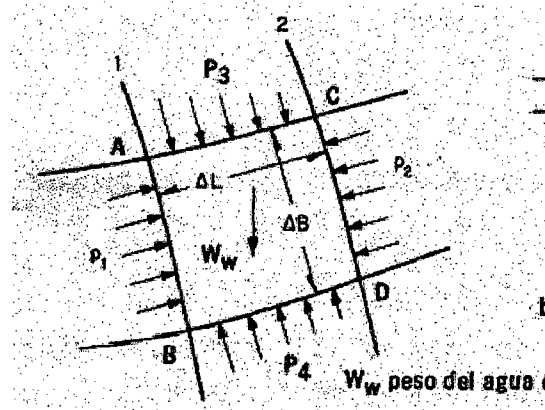


Figura 2.9: Cuantificación de la fuerza de filtración por unidad de volumen

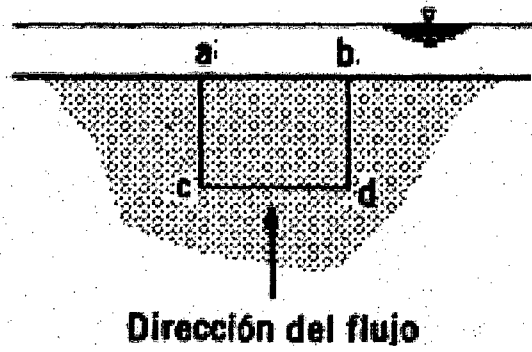


Figura 2.10: Gradiente hidráulico crítico

## CAPITULO 3

### FILTRACION Y DRENAJE EN PRESAS DE MATERIAL SUELTO

#### 3.1 INTRODUCCION

La teoría de escurrimiento o infiltración a través del cuerpo de una presa de tierra se basa en las condiciones de frontera, que se le asigna con la finalidad de reproducir el fenómeno en mención. estas condiciones tienen que ser definidas previamente, con la finalidad de simplificar el modelo. En este capítulo se presenta la metodología y los conceptos para determinar la filtración a través del cuerpo y la fundación de una presa de tierra, además se expone la importancia del drenaje de esta, los criterios de diseño para proyectar filtros y la importancia del núcleo como barrera impermeable

#### 3.2 PRESAS DE MATERIAL SUELTO

En la denominación genérica de presas de materiales sueltos se incluyen a todas las que se construyen con elementos naturales que pueden ser muy variados como tierras, gravas, arenas, escollera, etc. Que presenten una cohesión nula o que tengan un valor bajo de dicha propiedad y en todo caso que la cohesión sea muy inferior a la conseguida artificialmente mediante la adición de un aglomerante. Los materiales de estas presas se utilizan casi tal como se encuentran en la naturaleza, sin más elaboración que una elemental clasificación y un apisonado. Esta simplicidad de empleo junto con la disponibilidad de potentes medios de transporte y compactación hacen que resulten en principio más económicas que las de hormigón. Aunque parece un tanto simplista englobar en una misma denominación a presa con materiales tan diferentes como escollera y arcilla, pues no es así el hecho de su baja o casi nula cohesión les da un planteamiento común. Por lo general estas presas constan de varios materiales distintos, cada uno con una misión, por lo que sus problemas mecánicos e hidráulicos son comunes.



### 3.3 FILTRACION

El flujo de agua infiltrada a través de una presa de materiales sueltos o de su cimientamiento produce los siguientes efectos:

- Uno directo, de pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar o subsanar.
- Un estado de presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso. Además, al estar mojados los materiales, disminuye su cohesión y su resistencia al rozamiento, añadiéndose estos efectos al de las componentes desestabilizadoras de las presiones internas.
- El paso del agua a través de las zonas con materiales finos tiende a arrastrar esas partículas, con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva. Este fenómeno se llama sifonamiento (piping).

De los tres efectos, el último es el más peligroso, porque afecta directamente a la integridad misma de la presa. El sifonamiento es uno de las causa más importante de accidentes o roturas de este tipo de presas. Además, es el más difícil de controlar de los tres enunciados, lo que refuerza el interés del tema, al que concederemos la atención que merece mas adelante.

Los efectos desestabilizadores de la presión intersticial le siguen en importancia al sifonamiento, porque son más controlables con los dispositivos adecuados y hasta cierto punto previsible en los cálculos de estabilidad.

En cuanto a la pérdida de agua, sólo tiene valor económico. De ser excesiva, deberá disminuirse con impermeabilizaciones complementarias, pero en principio más por el peligro de sifonamiento que representa que por la propia pérdida, pues, en última instancia, siempre cabe recuperar el agua filtrada. Bombeándola al embalse.

De los efectos antes citados, el presente capítulo se ocupa del drenaje, del que depende el control de la presión intersticial. Pero como base previa para ello y el estudio de los otros efectos han de ampliarse algunos conceptos sobre la red de

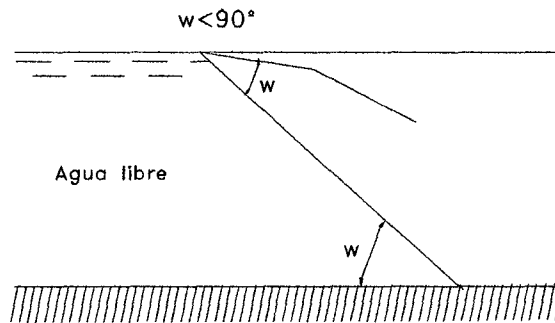
corriente que complementan los explicados en anteriormente y que son indispensables para la correcta definición de aquella. Como ya se dijo, hay varios métodos para determinarla: el más usado y general es el gráfico, que suele ser suficiente para la mayor parte de las presas, que son las de altura moderada o media (hasta algunas decenas de metros de altura); otros métodos requieren medios especiales, y pueden ser convenientes o indispensables en presas de gran altura o con problemas específicos de cimentación; pero aun en esos casos el método gráfico puede ser útil para una definición previa que ahorre tanteos más lentos y costosos.

### 3.3.1 Casos Singulares de Red de Corriente

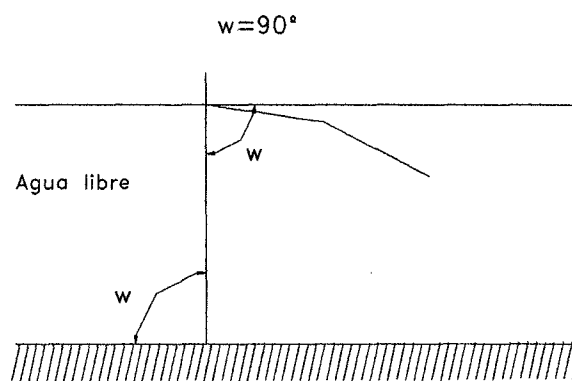
Ya se menciona en el capítulo 2 que en un flujo de superficie libre, cuando las permeabilidades de dos medios adyacentes son muy distintas, no se produce en el contacto una refracción propiamente dicha, sino una ruptura de las l.d.c., con una bajada brusca de la línea de saturación, eso tiene lugar cuando aguas abajo no se puede mantener una línea de saturación tan alta como exigiría en la salida de la línea de saturación del medio menos permeable aguas arriba. Cuando la relación de permeabilidades entre ambos medios es notable, la ruptura puede ser tan clara que el paso del medio más impermeable al otro se produce como si fuera a la atmósfera, es lo que suele ocurrir en el paso del núcleo a un espaldón permeable o a una capa drenante.

En flujos confinados, como los que se dan a veces en el sustrato, si hay presión fija aguas abajo (dada por el nivel del río o de la napa freática), ésta permite el mantenimiento del régimen en presión y no se produce el despegue, dándose la refracción según ley conocida. Pero aun en un flujo cautivo puede producirse un despegue en el contacto si las condiciones de presión aguas abajo no son suficientes para evitar presiones negativas; en esos casos se produciría un cambio de régimen en la zona de contacto pasando de confinado a libre, con la formación de una línea de saturación aguas abajo.

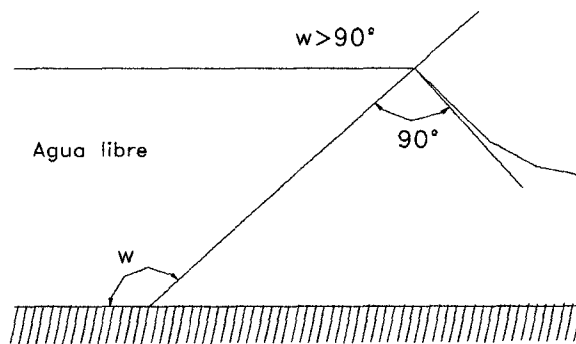
También puede observarse que cuando el medio más permeable está aguas arriba, siempre se puede producir la refracción, puesto que el nivel aguas abajo está asegurado, por el medio más impermeable.



(a)

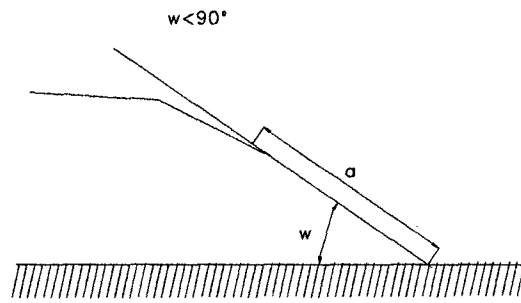


(b)

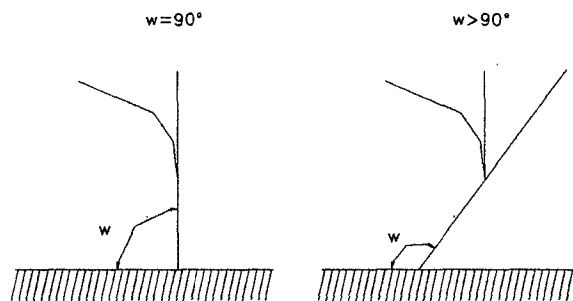


(c)

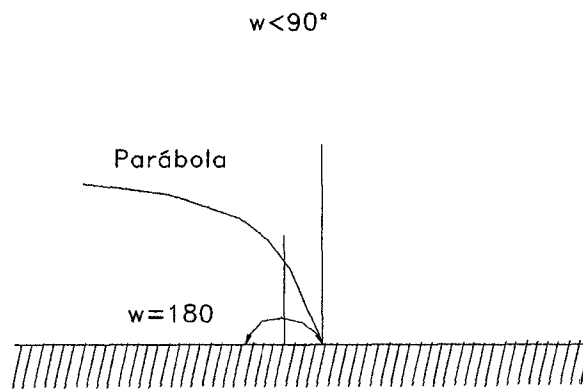
**Figura 3.1: Casos especiales de la red de corriente (Polubarinova- Koschina)**



(a)

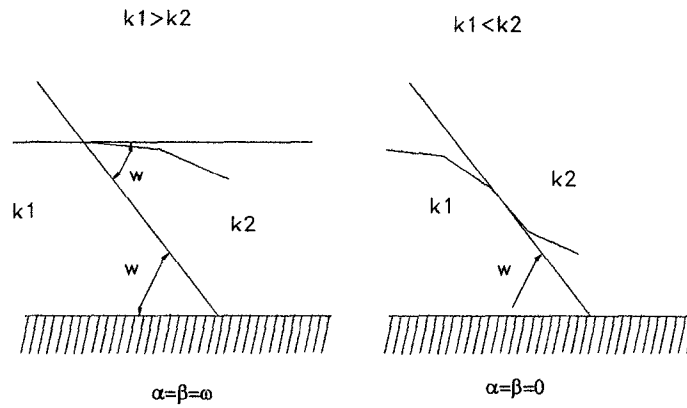


(b)

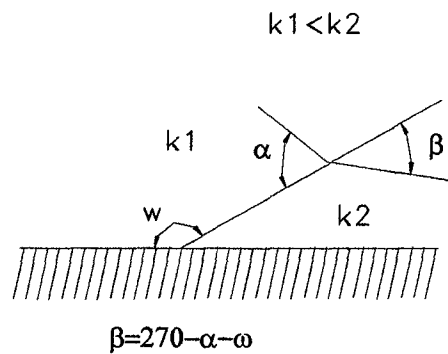


(c)

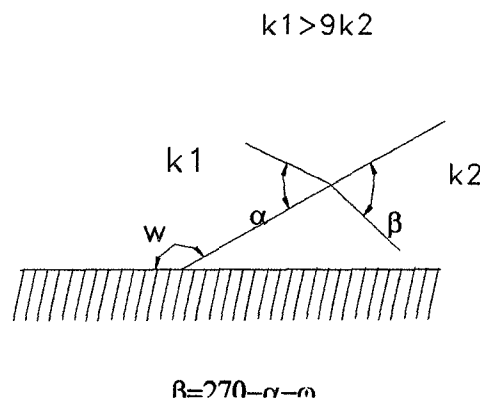
**Figura 3.2: Casos especiales del contacto de red de flujo(Polubarinova – Koschina)**



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.3: Casos singulares de red de corriente (Palubarinova – Koschina)**

Las salidas a la atmósfera o a un medio mucho más permeable, pueden presentar casos particulares, además de los normales tratados en capítulo 2. En las Figuras

3.1, 3.2 y 3.3 se muestran diferentes condiciones de contacto de una red de flujo con taludes especiales.

### 3.3.2 Línea de Saturación

Esta existe en todas las presas de materiales sueltos en las que hay flujo a través de la estructura de la presa. Sólo en casos particulares, el flujo puede producirse exclusivamente a través del cimientado y ser confinado. Por ello tiene gran interés determinar esa línea de saturación, pues con ella se define el contorno de la red y se facilita la obtención de las líneas restantes.

La ecuación (3.2) sólo tiene solución analítica en contados casos. Uno de ellos es el flujo a través de un medio isótropo A de extensión indefinida con una base horizontal B impermeable, en cuyo extremo O hay otro medio C infinitamente permeable (fig. 3.4). La red de corriente está formada por dos familias de parábolas homofocales con su foco en O, con ecuación general.

$$x = \pm \frac{1}{2k} \left( \frac{k^2 y^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (3.1)$$

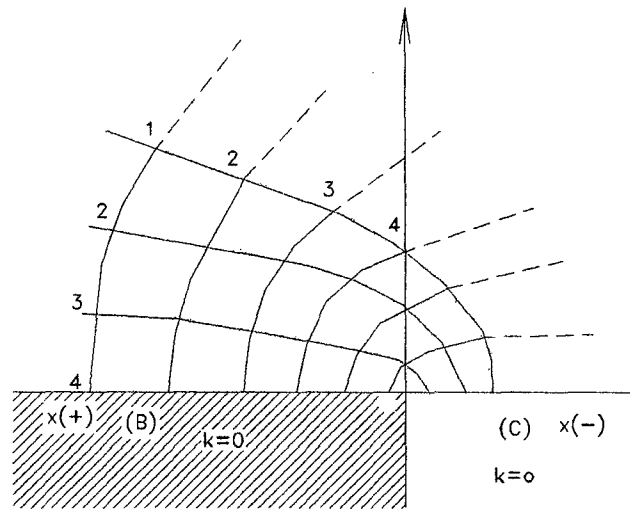
El signo + da las líneas de corriente y el - las equipotenciales. El parámetro  $\lambda$  es el potencial: dando valores a  $\lambda$  se obtienen tanto las l.d.c. como las equipotenciales. Una l.d.c. y la equipotencial simétrica respecto al eje Y se cortan en el punto de  $y = \sqrt{\lambda/2k}$ , además las parábolas cortan al eje X en puntos de  $x = \pm \lambda/2k$ .

El caso de una presa es bien distinto pues la equipotencial inicial AB (Fig.3.5) no es una parábola, pero distintos autores han propuesto adaptaciones sencillas para definir la línea de saturación con aceptable fidelidad. A continuación se presenta la solución de Casagrande (entre 1925 y 1940).

De sus propias experiencias y cálculos deduce que la línea de saturación en un dique trapezoidal homogéneo es bastante próxima a una parábola de foco O en el pie del talud aguas abajo, y origen en un punto A<sub>o</sub>, tal que AA<sub>o</sub> = 0,3 ABo

(Figura 3.6). Además, el punto Co de intersección de esa parábola con el paramento libre debe correr hasta C, siendo

$$CO = a = s - \sqrt{s^2 - \frac{h^2}{\text{sen}^2 \alpha}} \quad (3.2)$$



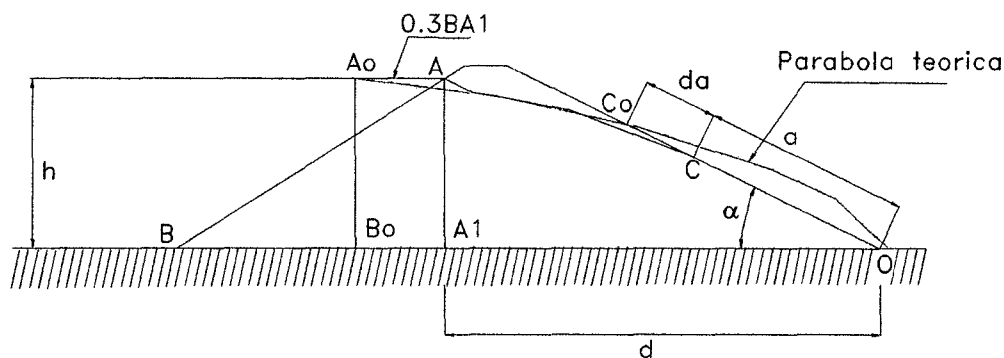
**Figura 3.4: Red de corriente formado por parábolas homofocales**

s es la suma de la longitud del arco de parábola AoCo más la del tramo CoO del paramento libre. Para  $\alpha < 60$  puede suponerse con suficiente aproximación que esa longitud es la hipotenusa del triángulo OAoBo:

$$s = \sqrt{h^2 + d^2}$$

y resulta:

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot \alpha} \quad (3.2')$$

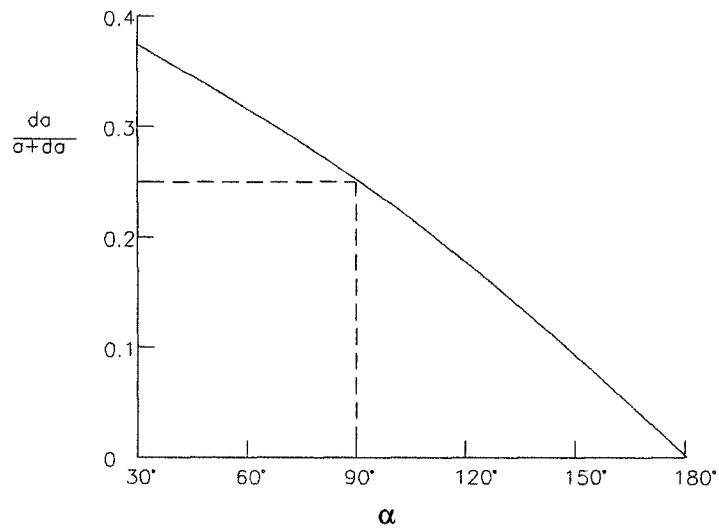


**Figura 3.5: Línea de Saturación teórica (Casagrande)**

Corregida la parte de parábola próxima al paramento para que el punto de intersección baje de  $Co$  a  $C$ , resta otra pequeña corrección del origen de la l.d.s. en el paramento mojado, de forma que sea normal a éste hasta empalmar con la parábola. Como se ve, ésta sirve sólo como guía general para, con las dos correcciones dichas, obtener la l.d.s. final.

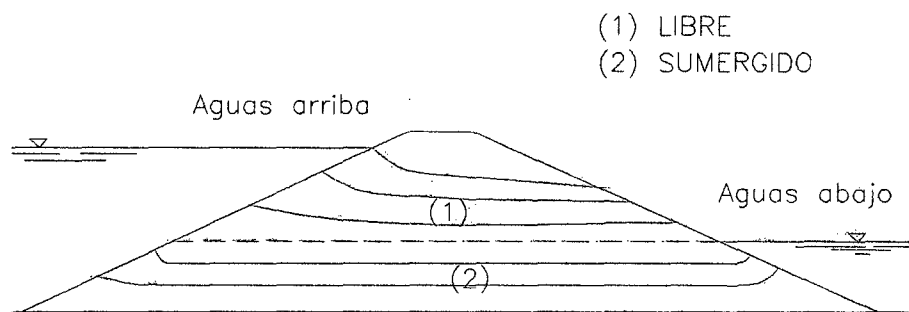
Esta construcción gráfica vale para  $\alpha < 60^\circ$ , lo que se cumple en todas las presas homogéneas. Pero en las heterogéneas hay núcleos verticales o inclinados y drenes interiores en los que la salida del agua al medio drenante puede dar ángulos  $\alpha > 60^\circ$  e incluso en desplome ( $\alpha > 90^\circ$ ). Puede darse este caso en una presa homogénea con drenajes horizontales profundos o drenes chimenea, Para estos casos Casagrande da un abaco (Figura 3.6) para determinar el desplazamiento  $\Delta a = CCo$ , del punto de salida respecto al de intersección de la parábola con el talud. Obsérvese que para un talud vertical ( $\alpha = 90^\circ$ ),  $\Delta a = a/3$ , y para  $\alpha = 180^\circ$  el punto de contacto coincide con el de la parábola, como es lógico, puesto que sería el caso de un dren horizontal en una presa homogénea.





**Figura 3.6: Curva para calcular el desplazamiento del punto de salida de la línea de saturación (Casagrande)**

Cuando la parte baja del paramento aguas abajo está sumergida, el problema puede ser planteado como separado en dos campos; el superior (1) hasta el plano de agua, que se trata como libre, y el inferior (2) sumergido, que puede considerarse como de flujo paralelo horizontal, pues las l.d.c. no difieren sensiblemente de esa disposición.



**Figura 3.7: Curva para calcular el desplazamiento del punto de salida de la línea de saturación (Casagrande)**

### 3.3.3 Trazado Manual de la Red de Flujo

Con el conocimiento de las propiedades de la red suele ser relativamente fácil su dibujo por aproximaciones sucesivas. Lo primero es tantear la forma general de la red sin detalles. Luego, si se trata de un flujo libre como es lo más común, se comienza por fijar la línea de saturación y a partir de ella, se tantean otras 2 ó 3 l.d.c., con otras tantas equipotenciales. Una vez construida esta red elemental, se puede subdividir y ajustar hasta obtener un resultado suficientemente satisfactorio y acorde con las condiciones de contorno.

En la mayor parte de las presas basta este procedimiento gráfico, pues en general el grado de precisión de los coeficientes de permeabilidad suele ser inferior al del método.

Otros procedimientos pueden dar mayor precisión, pero el costo y el tiempo necesarios se elevan notablemente, por lo que sólo están indicados o justificados cuando la seguridad lo exige, o cuando pueda el ahorro con el aumento de la precisión compensa los recursos empleados. En una presa sencilla y de altura moderada es poco probable lograr con otros métodos incrementos sensibles de seguridad o economía. En cambio, si la cimentación es compleja, puede ser difícil de precisar la red de corriente; o si la altura es importante, el efecto de una mayor precisión suele ser traducible en seguridad y costo. En estos casos el modelo analítico o analógico pueden ser obligados.

En cualquier caso, un previo ajuste gráfico es muy aconsejable, pues sirve de orientación de la forma general de la red y para señalar sus zonas críticas y, en último extremo, para darse cuenta de las limitaciones del método gráfico y convencerse de la necesidad de otro más preciso.

La gran facilidad de cálculo que proporcionan los ordenadores tiene la contrapartida de perder el contacto con el problema físico. Por eso nunca se insistirá bastante en la conveniencia de servirse, además, de otro procedimiento más elemental y directo que sirva de guía de cómo ocurren las cosas físicamente, así como de cotejo de los resultados de cálculos más sofisticados, para

ver si en el programa se ha deslizado algún error que conduce a consecuencias poco reales. El método gráfico cumple todas esas condiciones.

### 3.3.4 Medios Anisótropos

Es frecuente la anisotropía en el sustrato, e incluso en la propia presa, por el efecto de la consolidación producida por el apisonado, o debida a la acción de drenes horizontales. En estos casos cabe emplear un artificio de transformación de coordenadas para convertir la anisotropía en isotropía.

En un medio anisótropo continuo con permeabilidad máxima  $k_a$  en una dirección y mínima  $k_b$  en la ortogonal, la permeabilidad  $k$  según una dirección  $\alpha$  tiene una expresión elíptica (Figura 3.8):

$$\frac{1}{k_\alpha} = \frac{\cos^2 \alpha}{k_A} + \frac{\sin^2 \alpha}{k_B} \quad (3.3)$$

Si la anisotropía procede de que el medio está finamente estratificado, puede tratarse como continuo, tomando permeabilidades ponderadas; si  $e_i$  es el espesor de una capa y  $k_i$ , su permeabilidad (isótropa en cada capa), se tendrá:

$$k_A (\text{máximo}) = \frac{\sum_1^n k_i e_i}{\sum_1^n e_i} \quad k_B (\text{mínimo}) = \frac{\sum_1^n e_i}{\sum_1^n \frac{e_i}{k_i}} \quad (3.4)$$

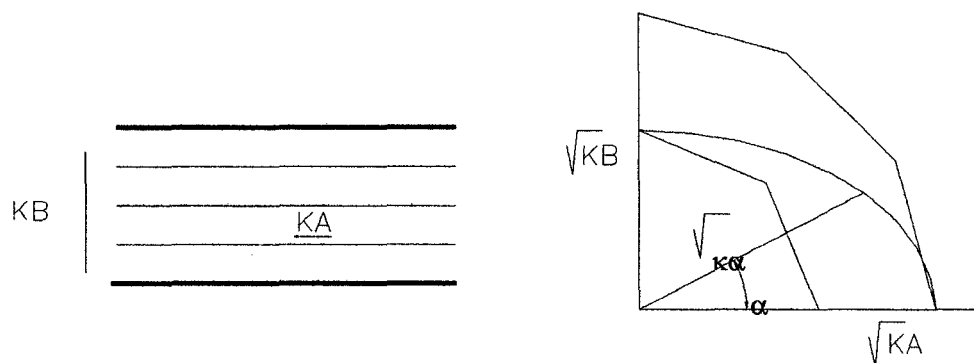


Figura 3.8: Permeabilidad en un medio anisotrópico

Haciendo la transformación  $x' = x\sqrt{k_A/k_B}$ , o bien  $y' = y\sqrt{k_A/k_B}$ , la elipse de la Figura 3.8 se convierte en uno de los dos círculos de trazos y el problema en isótropo. El contorno de la presa y su cimiento se distorsionan en. Una figura afín de razón horizontal  $x'/x$  o vertical  $y'/y$ , según el caso, y en esa figura se dibuja la red de flujo. Para volver a la real anisótropa, se deshace la transformación: la presa y su cimiento recobran su forma y dimensiones reales, y es la red isótropa la que se deforma con afinidad  $x/x'$  o  $y/y'$ , que dando resuelto el problema. (Al deformarse, la red deja de ser ortogonal en anisotropía.)

En los casos mas complejos varias capas de formas irregulares y con permeabilidades distintas pueden hacerse simplificaciones, agrupando las capas en conjuntos según sus características y espesores medios o acudir a otros procedimientos más complejos.

### 3.3.5 Métodos Numéricos Para el Calculo de la Red de Flujo

Ya se dijo que la solución analítica de la ecuación de Laplace sólo es posible en casos muy concretos. Pero utilizando elementos finitos puede obtenerse una solución numérica, partiendo de dicha ecuación junto con las condiciones en el contorno exterior, y las de frontera interior entre medios diferentes. Todo ello da lugar a un sistema de ecuaciones lineales que se resuelve matricialmente. Pero dadas las particularidades analíticas del problema puede ser mas práctico y simple emplear un método cuyo procedimiento es como sigue:

- Se divide el espacio en rectángulos y triángulos con líneas paralelas a los ejes coordenadas que sirven de elementos básicos.
- Se parte de una primera distribución de líneas equipotenciales, que puede ser el obtenido por un primer tanteo gráfico. Como se trata de un punto de arranque en un proceso convergente de aproximaciones

sucesivas, la precisión de esa red inicial puede ser grosera; incluso cabría partir de unos potenciales arbitrarios.

- Partiendo de los datos de esa red, se comprueba la ecuación (3.3) en varios puntos, que darán una distorsión más o menos acusada, según el acierto de la red inicial.
- A la vista de estos resultados, se corrige la red. En general, para acelerar el proceso conviene exagerar un poco las correcciones respecto a las de presunto equilibrio.
- Con la red corregida se itera el proceso hasta lograr unos resultados aceptables.

### 3.3.6 Modelos Analógicos

Estos modelos son de dos tipos principales: hidráulicos y eléctricos. Los modelos hidráulicos reproducen la filtración de una forma similar a la real del prototipo, tanto en la presa como en el cimiento. En general se utiliza un modelo bidimensional de la mayor sección de la presa, o de dos secciones significativas, si hubiera cierta heterogeneidad del cimiento. Este se reproduce hasta la profundidad que se considere suficiente para simular el fenómeno conjunto de la filtración (normalmente hasta una profundidad del orden de la altura de la presa).

La permeabilidad del modelo es siempre mayor que la del prototipo (suele emplearse, arena), pues gracias a las propiedades de la red de corriente las formas exteriores y las condiciones en los límites externos o en las fronteras internas entre medios distintos son los que fijan la red, y no la permeabilidad (que no figura en la ecuación de Laplace), que sólo influye en la velocidad. La mayor permeabilidad da lugar a mayores velocidades, lo que facilita la observación del fenómeno y la medición de potenciales y velocidades (que luego hay que traducir a las reales). Incluso cabe variar los taludes utilizando una proporción de afinidad, de forma similar a lo dicho en 3.4 (aunque por otro

concepto), si se viera útil para la ejecución del modelo con el empleo de determinados materiales.

La mayor dificultad se encuentra al intentar reproducir medios de distinta permeabilidad (las permeabilidades absolutas no cuentan, pero si las relativas), pues influyen en la refracción o ruptura de las l.d.c.). Para resolverla se acude a veces a deformaciones geométricas del modelo de efecto equivalente. Otro factor a tener en cuenta es la influencia de la capilaridad, que es relativamente mayor en el modelo que en el prototipo; para disminuirla se emplea agua con detergente o se trata la arena con silicona para hidrofugarla.

La gran utilidad de los modelos hidráulicos es que permiten ver y medir directamente el fenómeno en una reproducción física bastante similar a la real.

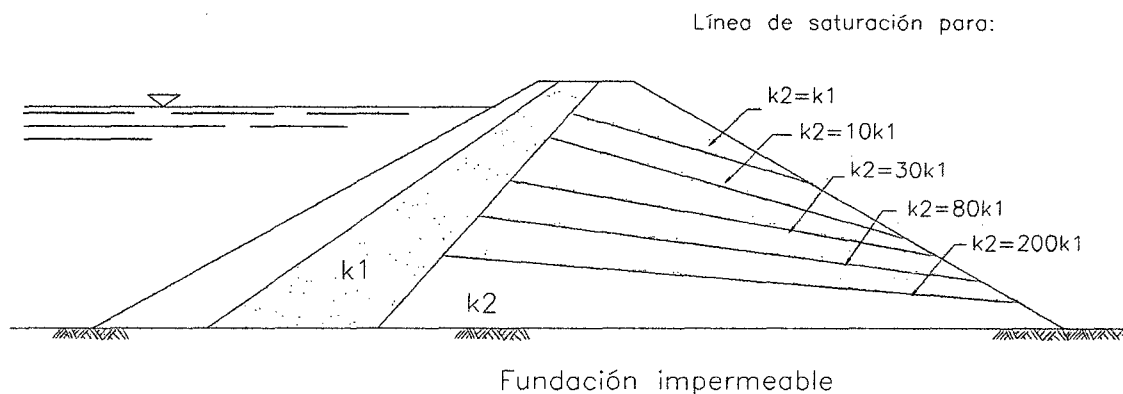
Los modelos eléctricos reproducen, por analogía, la ecuación de Laplace, que es común a todos los campos físicos con redes armónicas: hidráulicos, eléctricos, magnéticos, etc. La utilidad de los modelos eléctricos reside en que las intensidades y tensiones son fáciles de medir, y la instalación es más simple y de espacio más reducido que la hidráulica, que requiere un depósito, bombas, circuitos de tuberías, etc., además del propio canal del modelo.

En la reproducción eléctrica, que es bidimensional, los potenciales son tensiones y los caudales intensidades. La sección se reproduce con las condiciones eléctricas semejantes de su contorno. Si hay zonas de distinta permeabilidad se traducen en el modelo con materiales de distinta conductividad, que es fácil de reproducir, y es una ventaja de los modelos eléctricos.

Estos se aplican mejor a flujos confinados. En los de régimen libre (la mayoría en presas) es mejor el modelo hidráulico o la solución numérica. Cabe también un uso combinado de los dos modelos.

### 3.3.7 Estimación de las Presiones y del Caudal

Conocida la red de corriente por el o los procedimientos idóneos, se obtiene la velocidad en cada punto por medio de la ecuación (2.1), e integrando a lo largo de una sección curva equipotencial, se calcula el caudal filtrante. Si se quiere conocer el caudal en una zona concreta, basta limitar la integración entre las dos l.d.c. que la comprendan.



**Figura 3.9: Influencia de la relación de permeabilidades entre el núcleo y el espaldón en la línea de saturación**

### 3.3.8 Influencia de la Capilaridad

Todos los métodos descritos prescinden de la capilaridad. Esta introduce en la realidad ciertas correcciones a la red de flujo, pues permite que en ciertas zonas puedan producirse tracciones, que no han sido tenidas en cuenta en lo anterior. El efecto más importante es quizá la posible ascensión de la superficie libre. Se sabe que en suelos con finos los niveles capilares pueden mantenerse algunos metros por encima del nivel estático, pero en arcillas pueden alcanzar kilómetros. Por supuesto, estos casos extremos se refieren a niveles históricos o

geológicos que no es el caso de las presas, en las que el embalse oscila con cierta frecuencia y hay órganos de control y drenaje.

Este efecto, aunque teóricamente posible, en la realidad suele ser mínimo en las presas porque, además de las razones dichas, la succión capilar suele venir acompañada por un descenso de la humedad y una entrada del aire progresiva, cuyos efectos crecen por la circulación del agua. Por todo ello, en las presas, la capa capilar, si existe, no está saturada, por lo que participa poco en el movimiento general. En la práctica se suele prescindir de este efecto en el cálculo de la red, y la experiencia ha corroborado que es suficientemente correcto. Sólo en algunos casos puede ser necesario tener en cuenta la capilaridad en el cálculo de tensiones reales en puntos o zonas de la presa.

### **3.4 DRENAJE**

El drenaje es, en apariencia, una contradicción con la función impermeabilizadora del núcleo de la propia presa, si es homogénea e impermeable. Pero ya se ha visto que es un complemento insustituible en la mayoría de los casos, de la misma forma que los frenos de un vehículo opuestos a la marcha de éste son necesarios para garantizarla con seguridad. El drenaje hace bajar la línea de saturación, la aleja del talud aguas abajo, disminuye el gradiente en esa zona y reduce las presiones intersticiales. Su único defecto es que incrementa la filtración, pero esto es de menor importancia, dado el gran margen de impermeabilidad que tienen los núcleos, y más en las presas homogéneas.

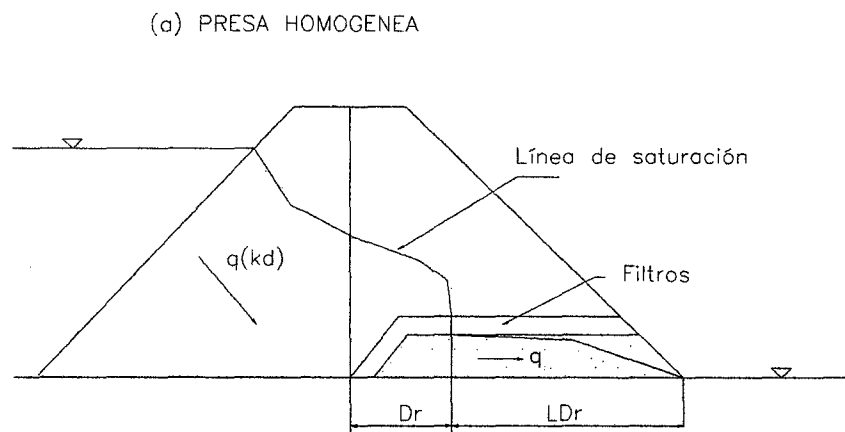
#### **3.4.1 Espaldón Permeable**

La forma más sencilla de conseguir el drenaje es con un espaldón permeable aguas abajo del núcleo. El efecto drenante se produce en cuanto la permeabilidad del espaldón es del orden de 10 a 20 veces mayor que la del núcleo, pero para que sea no sólo sensible, sino eficaz, se precisan desproporciones mucho mayores: al menos 100, y más bien 400 cuando el núcleo es delgado, si se quiere conseguir un descenso radical de la línea de saturación de forma que su salida en el paramento está próxima a su pie. En la figura 3.10 puede verse la influencia

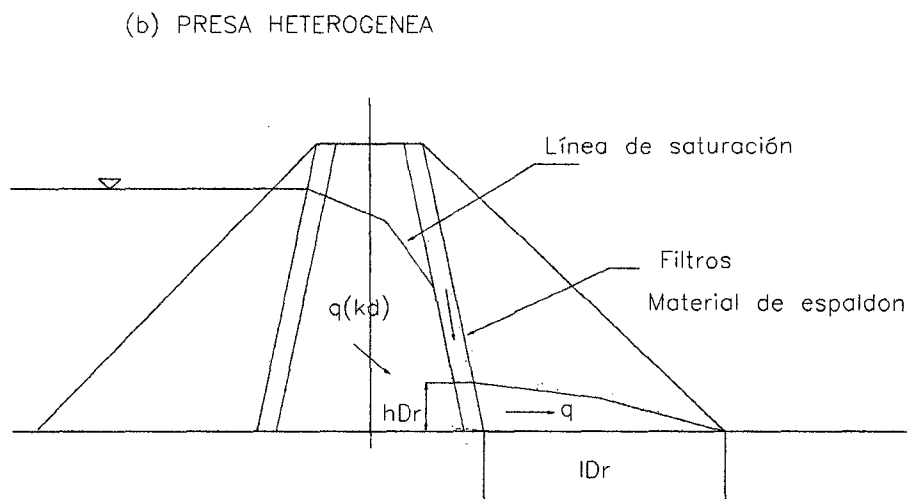


de la relación de permeabilidades en la línea de saturación con cimiento impermeable. Cuando el espaldón es muy permeable, el agua filtrada cae libremente, como si saliera a la atmósfera; la l.d.s. es simplemente la necesaria para que el agua recorra la base del espaldón. El caso opuesto,  $k_1/k_2 = 1$  es el de una presa homogénea sin drenaje.

Esto se refiere a un espaldón isótropo, pero la compactación y el propio funcionamiento del drenaje tienden a dar una anisotropía con mayor permeabilidad horizontal que vertical. La anisotropía encauza la filtración y dificulta el descenso de la l.d.s. Si el cimiento es permeable, el efecto de la anisotropía puede ser aun más pronunciada.



**Figura 3.10a: Drenaje del agua de filtración en el caso de una presa homogénea**



**Figura 3.10b: Drenaje del agua de filtración en el caso de una presa heterogénea**

### 3.4.2 Capa Drenante

Con frecuencia el material disponible para espaldones no es tan permeable como para producir el deseado efecto drenante, y hay que acudir a una capa drenante intermedia entre el núcleo y el espaldón, con salida a través de un dren horizontal en la base, formando en conjunto un dren en L.

El dren ha de proyectarse de forma que evacue con amplitud la filtración procedente del núcleo y eventualmente del espaldón, cuyo caudal se obtiene de la red de flujo, para calcular la capacidad necesaria de filtración del dren habría que conocer también su propia red de flujo, pero, suele bastar conocer aproximadamente el gradiente entre los extremos del dren y su permeabilidad para conocer la velocidad de filtración y la sección necesaria. En principio, se aconseja tomar la permeabilidad mínima obtenida en el laboratorio y adoptar, además, un coeficiente de seguridad 2 en el cálculo de la sección. Si hubiera la posibilidad de producirse asentamientos importantes se necesario aumentar el factor de seguridad.

Si se quiere evaluar mejor la capacidad de evacuación del drenaje, hay que afinar en primer lugar, la estimación de los caudales de filtración, en el peor de los casos debe estudiarse la posibilidad de fisuración del núcleo, fracturación hidráulica o segregación de los materiales. La línea de saturación no debe superar la parte superior del dren. Existe el error de creer que una suficiente permeabilidad del dren es suficiente para controlar la filtración, pero en este caso es un problema que afecta no sólo a la microgeometría del diseño, sino a su macrogeometría.

Se suele calcular, según la ley de Darcy, con un adecuado coeficiente de seguridad. Para drenes gruesos, se presenta el problema de la turbulencia que disminuye la capacidad de transporte.

En los materiales gruesos no hay seguridad de que pueda considerarse válida una ley lineal como la de Darcy para expresar la velocidad en función del gradiente hidráulico. Parece que esa ley se cumple sólo por debajo de un cierto número, de Reynolds.

Efectuando determinados análisis sobre modelos teóricos con distintas formas del canal que forman los poros se puede determinar la línea que separa el campo de validez de la ley de Darcy (Fig.3-12). El gradiente crítico, más allá del cual empiezan a jugar un papel significativo los efectos no lineales, el cual es proporcional a la inversa de la tercera potencia del tamaño de grano ( $d_w$ ).

Se ve que pueden afectar a tamaños superiores a la arena gruesa, a las gravas medias y gruesas a partir de gradientes no muy altos.

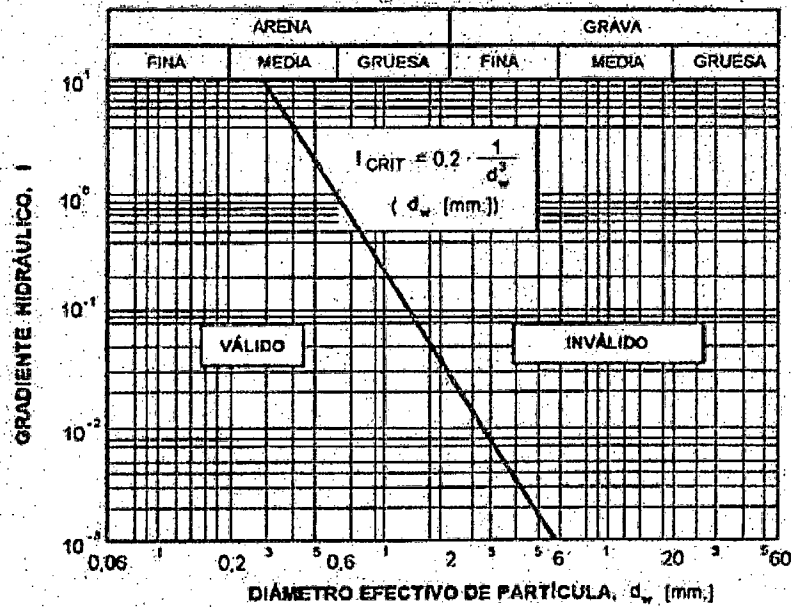
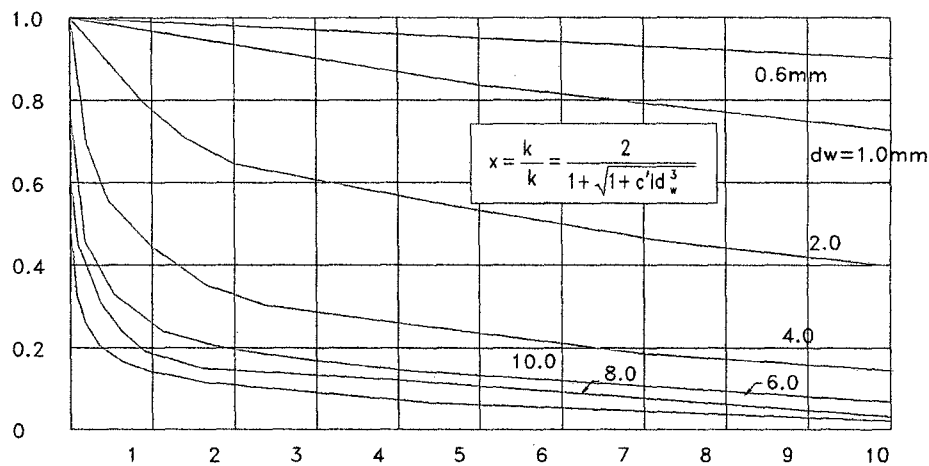


Figura 3.11: Campo de validez de la ley de Darcy



**Figura 3.12: Factor de reducción de la permeabilidad, debido a efectos no lineales.**

En relación con la capacidad de drenaje de las capas drenantes de una presa, no tiene tanto interés el modelo específico de la ley de flujo no lineal a aplicar en cada caso, sino que basta conocer la reducción sobre la permeabilidad para obtener la permeabilidad aparente. De los estudios realizados por Cedergreen podríamos deducir un valor ( $x$ ) por el que hay que multiplicar la permeabilidad  $K$  según Darcy para obtener la permeabilidad aparente  $K^*$ .

El factor de reducción  $x$  depende, como podría esperarse, del gradiente hidráulico y del tamaño de grano del material en cuestión.

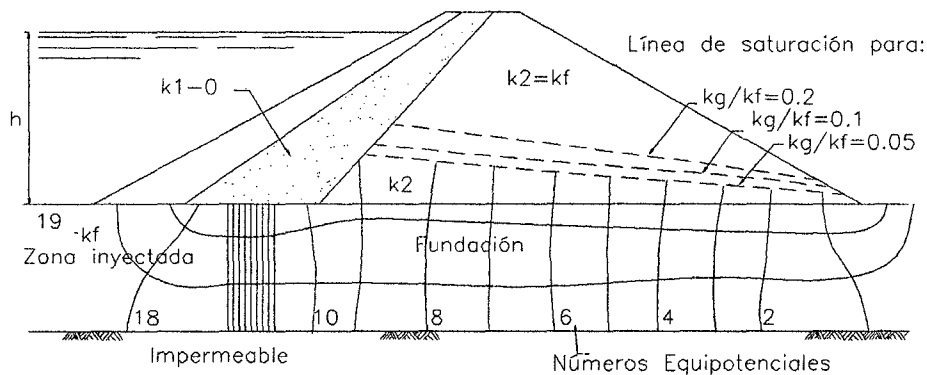
El factor de reducción de la permeabilidad se obtienen de la Figura 3.13. en esta figura se puede ver que los efectos no lineales son despreciables para materiales como las arenas finas y medias con gradientes iguales o superiores a 10. Pero si  $d_w$  es por ejemplo 10 mm el coeficiente de permeabilidad bajo un gradiente  $I=1$ , es aproximadamente la décima parte del que le correspondería según la ley de Darcy.

### 3.5 IMPERMEABILIZACION DEL SUELO DE FUNDACION

#### 3.5.1 Pantallas de Impermeabilización de la Fundación

Como ya se dijo una presa de materiales sueltos puede asentarse sobre el cause de un río (materiales transportados), la impermeabilización se realiza mediante la profundización del núcleo (menor a 10 m). Pero si la profundidad de ésta sobrepasa ese límite o la presa no tiene núcleo, hay que acudir a otros tratamientos como: tablestacas, pilotes secantes, cortina o pantalla inyectada, trinchera de lodos o zampeados.

Ninguno de ellos consigue una impermeabilización total, pero, si una pérdida de carga en el flujo de filtración localizada en una cierta zona que produce un descenso brusco de las líneas equipotenciales y que al concentrar el gradiente en esa zona, lo reduce aguas abajo, por lo consiguiente se produce una disminución de las presiones intersticiales, velocidades y caudal. En la figura 3.14 se ve el efecto de una pantalla impermeabilizadora (de cualquier género) en la red de corriente.



**Figura 3.14: Influencia de la permeabilidad de una pantalla inyectada en la línea de saturación.**

Se llama eficacia de una pantalla a la pérdida de carga que produce respecto a la total, siempre inferior al 100 %, que correspondería a la estanqueidad total inalcanzable.

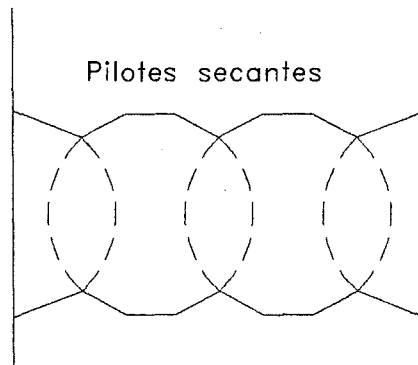
### 3.5.1.1 Tablestacas

Son poco efectivas, del 10 al 20 % inicialmente, llegando hasta el 20 ó 40 % al cabo de unos años (5 a 20) por retención de finos y corrosión de las juntas. Se pueden usar tablestacas en doble T para mayor rigidez, o una doble fila de tablestacas simples, y en ambos casos se rellena o inyecta el espacio interior para aumentar la estanqueidad. Se ha llegado a profundidades de unos 50 m, pero la opinión más generalizada es que hay otros medios más efectivos y económicos de impermeabilización (incluso las pantallas incompletas, pueden ser de una eficacia similar). Además, en terrenos con bolos la hinca resulta difícil y en ocasiones imposibles, por lo que se opta por otros procedimientos. En cambio, en obras provisionales (ataguías) en las que la impermeabilidad y duración exigidas son menores, se siguen usando porque es un procedimiento rápido, y la permeabilidad se puede ir corrigiendo con inyecciones o vertidos de arcilla hasta el punto que resulte suficientemente satisfactoria.

### 3.5.1.2 Pilotes Secantes

Es un sistema que teóricamente cierra por completo el paso del agua, pero las imperfecciones de su perforación y relleno se traducen en filtraciones. Su eficacia depende mucho del terreno y de la técnica empleada, así como de la experiencia del constructor (todos estos procedimientos requieren técnicas depuradas, normalmente patentadas y realizables sólo por empresas especializadas).

El proceso constructivo es en líneas generales, el siguiente: se perfora un cilindro vertical de unos 60 cm de diámetro con trépano y cuchara, y se va rellenando con lodo bentonítico para contener el terreno; terminada la perforación, se sustituye el lodo de relleno por concreto, inyectando desde abajo hacia arriba, para ir desplazando los lodos, hasta que queda formado el pilote de concreto. Cada pilote se perfora de forma que corte a los dos adjuntos para asegurar la barrera impermeable. Una vez formada ésta, se completa con inyecciones, bien generales o en las zonas en que se vean necesarias (ver Figura 3.15).



**Figura 3.15: Pilotes secantes**

### **3.5.1.3 Trinchera de Lodos**

Se usa en zonas con espesores de relleno menores de 25 m. La trinchera es de 1 a 3 m de ancho, se excava con una draga mecánica, empezando por un extremo de la presa y siguiendo hasta el otro. La contención de las paredes se logra con lodo bentonítico, que luego se sustituye por una mezcla de grava, arcilla o bentonita, que se coloca también con la draga, desplazando arena y sucesivamente al lodo. Hay que tener un especial cuidado para evitar la tendencia a la segregación del material de relleno.

### **3.5.1.4 Cortina o Pantalla Inyectada**

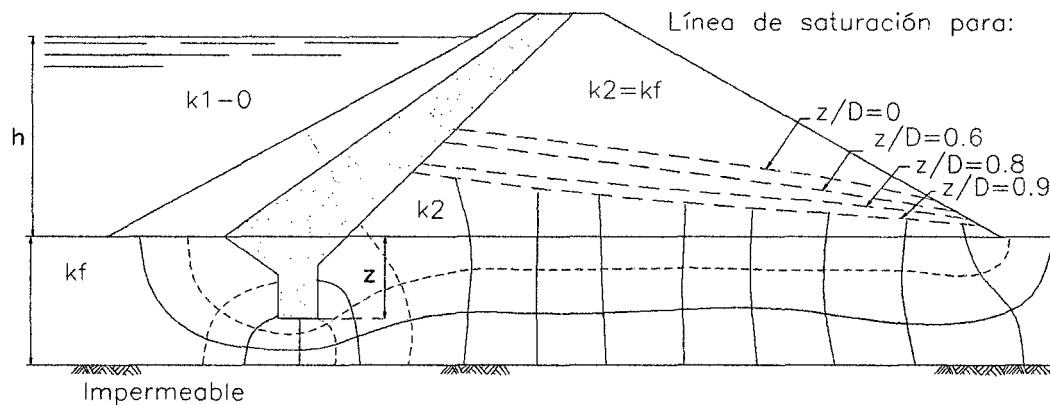
Puede llegar a profundidades de hasta 150 m, los barrenos se disponen en varias filas con distancias entre 2 y 3 m, para evitar derrumbes. presiones altas de inyección para provocar la formación de grietas y la penetración de la lechada por ellas. El producto inyectado suele ser una mezcla de arcilla, bentonita y cemento, con aditivos para facilitar la fluencia de la pasta. Para rellenar los huecos mayores se añade arena fina y asegurar un mejor taponamiento.

Se puede conseguirse mayor impermeabilidad construyendo dos pantallas paralelas, inyectando el terreno intermedio o excavándolo al amparo de las pantallas y rellenándolo con una mezcla de baja permeabilidad.

### 3.5.2 Pantallas Incompletas

Cuando la profundidad de la capa impermeable bajo los rellenos es considerable y no resulta factible llegar a ella (si está a más de 150 m), en estos casos es forzoso limitar la profundidad de la pantalla. Esas pantallas parciales o incompletas, o rastrillos (cutoff en ingles) consiguen al menos una pérdida de carga, por supuesto mucho menor que la pantalla completa, pero de cierta eficacia por el estrechamiento que producen en el flujo.

En la Figura 3.16 se ve el efecto de una pantalla parcial en la red de flujo, según su profundidad relativa al total hasta la capa impermeable. Se observa que incluso con un cierre del 90 % sólo se consigue una reducción del 50 % en el gradiente, pero aun así, esa reducción puede tener interés por su efecto en la línea de saturación a la salida del paramento. Sin embargo antes de decidirse por un cierre parcial es aconsejable asegurarse de que la capa impermeable está realmente a una profundidad excesiva, antes de decidir el cierre incompleto.



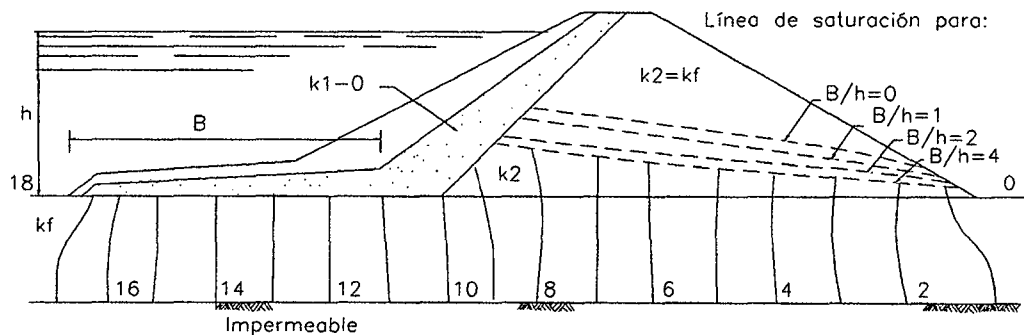
**Figura 3.16: Influencia de la profundidad relativa de una pantalla Parcial en la línea de saturación.**

### 3.5.3 Zampeados de Impermeabilización(blanket)

Cuando el terreno impermeable se encuentra a mucha profundidad y no es factible o económico llegar hasta el con una pantalla impermeabilizadora, una alternativa de solución es la pantalla de penetración parcial que es un zampeado o manto horizontal impermeabilizante desde el núcleo hacia aguas arriba para



conseguir, al menos, un estiramiento de las líneas de filtración y la consiguiente reducción del gradiente, como se ve en la Figura 3.17.



**Figura 13.17: Influencia de un zampeado en la línea de saturación.**

En principio, el zampeado se adapta mejor a un núcleo inclinado, pues a igualdad de longitud el recorrido bajo la presa es mayor que con uno central.

El zampeado debe tener un largo de 3 a 10 veces la altura de la presa, lo que conduce a varios cientos de metros de longitud hacia agua arriba en cuanto la presa tenga alrededor de 100 m; en la presa de *Tarbela* (Pakistán), de 150 m de altura, se ha dispuesto un manto de unos 1.50 m de longitud, con espesores de 15 m al pie del núcleo y 1,25 en el extremo aguas arriba. También en la presa Tinajones de nuestro país se cuenta con este sistema.

Normalmente el zampeado se complementa con una o más filas de pozos drenantes aguas abajo de la presa, para hacer más efectivo el descenso de presiones intersticiales y facilitar la medición de la filtración. Con ese complemento han dado buenos resultados en varias presas.

Una ventaja de los zampeados es que los materiales finos que lleva el agua en suspensión y que se depositan al pie de la presa incrementan su impermeabilidad. En algunos casos se han detectado ganancias del 40 al 60 % en la disminución del caudal filtrado al cabo de cinco a siete años de explotación.

Una obra de tal longitud presupone, para ser económicamente viable, una simplicidad de construcción. Esta es fácil, pues consiste en extender y compactar

el material en capas horizontales con espesor total relativamente moderado, directamente sobre el material de depósito, con sólo una limpieza de la capa vegetal. En principio, si el material empleado es el mismo subyacente añadiéndole elementos más finos o quitándole los más gruesos, suele producirse un efecto de filtro suficiente; si no fuera así, teóricamente debería ponerse uno entre ambos medios, pero esto complica y encarece la obra.

Estas limitaciones prácticas conducen a los siguientes defectos eventuales:

- Los gradientes suelen ser mayores que los que se dan en los núcleos. En esta rara vez exceden de 3 a 4, mientras que en los zampeados llegan a 10 frecuentemente.
- La ausencia del filtro (frecuente) puede dar lugar al sifonamiento a través del material aluvial. Esta posibilidad se refuerza por el hecho de que el zampeado está sometido a toda la carga de agua del embalse contrarrestada sólo en parte por la subpresión bajo el zampeado. Esa acción sobre un subsuelo heterogéneo produce asentamientos diferenciales que se traducen en grietas en el zampeado.
- Si el material aluvial bajo el zampeado es de densidad relativamente baja, puede sufrir licuefacción, por efecto de un sismo, lo que aumenta las posibilidades de agrietamiento.
- En contraste con los núcleos que se encuentran sujetos entre los espaldones, el zampeado tiene su cara superior expuesta directamente al agua, que puede ablandarla y disolverla.

Todas estas razones en pro y en contra deben analizarse antes de decidir un zampeado. Con frecuencia una pantalla incompleta resulta más efectiva y con menos riesgos, sobre todo cuando los materiales del cauce forman capas con mayor permeabilidad horizontal que vertical, lo que aminora el efecto del zampeado y se cierra mejor con una pantalla transversal, aunque sea incompleta.

En general, los obstáculos verticales son más eficaces que los horizontales (de 2 a 3 veces), pues se oponen más directamente al flujo filtrante y le obligan a un mayor contorno. Pero en cada caso hay que contemplar todas las circunstancias y decidir la solución idónea. Y es obvio que también cabe soluciones mixtas de un zampeado con cortinas verticales parciales o con otras de las soluciones antes descritas.

En la Figura 3.17 puede verse el efecto de un zampeado, en la red de flujo, así como la variación que produce en la línea de saturación en función de su longitud relativa..

### 3.6 CAUDAL FILTRADO POR LA FUNDACION

La red de corriente a través del cimiento se determina por los procedimientos descritos y de ella se puede deducir el caudal filtrado integrando la ecuación (3.1). Pero en caso de que haya una pantalla o zampeado puede hallarse directamente con bastante aproximación por medio de fórmulas.

En el caso de una pantalla, el caudal filtrado es (*Ambraseys*, 1963):

$$\frac{Q_0}{k_0 H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B}{D} + \left( \frac{k_0}{k} - 1 \right) \frac{E}{D}} \quad (3.5)$$

Donde:

$Q_0$  = Caudal filtrado (m/s).

$K_0$  = Coeficiente de permeabilidad del acarreo natural.

$K$  = Coeficiente de permeabilidad de la pantalla (m/s).

$H$  = carga de agua en el embalse (m).

$B$  = base de la presa (m).

$E$  = espesor de la pantalla (o acarreo inyectado) (m).

$D$  = profundidad (espesor vertical) del acarreo permeable (m).

Si la pantalla fuera incompleta y dejara una abertura vertical  $D - z$  sin impermeabilizar (Fig. 3.16), el caudal filtrado por la pantalla puede considerarse despreciable frente al que pasa por el espacio libre:

$$\frac{k_0}{k} = \frac{D - z}{D} \quad (3-6)$$

Si la pantalla es completa, pero tiene defectos o huecos previsibles o constatados (contactos incompletos entre pilotes o tablestacas, bolsadas, etc) puede emplearse la misma fórmula (3.5) estimando la proporción previsible de esos huecos en el total de la pantalla y asimilándolos a una abertura  $D - z$ .

Si se trata de un zampeado, el caudal viene dado por la fórmula de Dachter (1936);

$$\frac{Q_0}{k_0 H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B + B'}{D}} \quad (3-7)$$

Obsérvese que es igual a la (ecuación 3.5) es una derivación de ella haciendo la sustitución.

$$B' = \left( \frac{k_0}{k} - 1 \right) E \quad (3-8)$$

Por tanto, un zampeado y una pantalla cuyas dimensiones y características cumplan esta última condición serán de eficacia equivalente (igual caudal filtrado).

### 3.7 NUCLEOS Y FILTROS

De los tres efectos de la filtración que son pérdida de agua, presiones intersticiales, y arrastre de finos, analizaremos el tercero por ser el lavado de finos por arrastre, después del rebosamiento del agua por encima de la presa, la

segunda causa de fallos y accidentes en las presas de materiales sueltos, lo que demuestra el interés de su estudio.

En resumen: las causas de fallas han sido fundamentalmente técnicas. Con los conocimientos y los medios de hoy día es posible controlar la tendencia al lavado de finos, concretamente con el empleo de filtros adecuados cuya carencia o defecto han sido la causa de casi todos los accidentes conocidos.

El filtro es un elemento intercalado entre el medio impermeabilizador y el drenaje, cumple una función ambivalente: es el primer paso del drenaje y al mismo tiempo debe proteger al núcleo del riesgo de erosión por el paso de agua. Esta segunda función es tan importante que supera el carácter aparentemente complementario del drenaje y convierte al filtro en un elemento fundamental para la seguridad de la presa. Pero es más: el filtro no sólo detiene el paso de finos a través de él, sino que al conseguirlo, provoca inductivamente que la plasticidad del núcleo vaya cerrando las fisuras que se producen en él.

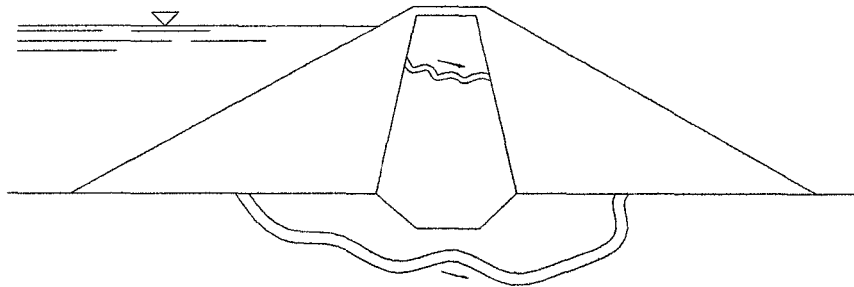
Este efecto en el autosellado de fisuras hace cambiar de forma sustancial el enfoque de múltiples medidas precautorias que tradicionalmente se han venido usando contra la fisuración y el sifonamiento, aunque el proceso del cambio pueda ser lento.

### **3.7.1 Erosión Interna( Sifonamiento y Sifusión)**

Cuando la circulación de agua a través de la presa o del terreno ocasiona un arrastre incontrolado total o parcial de partículas (en general el fenómeno comienza por las más finas), se dice que se produce la erosión interna. Ante esta erosión interna, que constituye una gran amenaza para las presas de materiales sueltos, la mejor defensa parecen ser los filtros. La erosión interna puede iniciarse por un fenómeno de fracturación hidráulica, de la que se trata en el Sifonamiento que es la formación conducto a través de la presa o de su cimiento por erosión progresiva(Figura 3.17). De ahí su nombre en inglés (piping), o tubificación.

Las causas más importantes que podemos citar cómo origen de un sifonamiento son las siguientes:

- Ausencia de un filtro adecuado aguas abajo
- Madrigueras y túneles de roedores y otros animales
- Mal contacto con estructuras de fábrica o metálicas
- Fugas desde un conducto situado bajo el terraplén
- Presencia de fracturación o de huecos geológicos en la cimentación
- Fracturación hidráulica
- Flotación de zonas arenosas por la velocidad creada por el incremento de presiones intersticiales
- Fisuras de retracción por desecación o el asiento por imbibición o colapso hidráulico
- Raíces de Árboles secos.
- Licuefacción.



**Figura 3.18: Sifonamiento a través del cimiento de una presa**

Al paso del agua a través de la presa o del terreno subyacente se producen fuerzas opuestas de acción y reacción, los granos de árido se oponen al flujo y hacen perder energía al agua, y ésta, a su vez actúa sobre las partículas, tendiendo a moverlas. Cuando la fuerza actuante es mayor que la resistente, el arido es arrastrado. Las fuerzas resistentes son el peso, la cohesión, el rozamiento y el bloqueo entre los granos. Los elementos más finos son menos pesados, cuando están saturados, disminuye su rozamiento y cohesión, lo que predisponen a ser arrastrados. Además su menor tamaño les permite pasar por los huecos de otros materiales.

Un punto al que no se dedica generalmente suficiente atención es a la posibilidad de sifonamiento a través del terreno, cuando éste es compacto e impermeable. Pero existen algunos terrenos con fracturación importante, como algunas areniscas, donde la existencia de zonas menos cementadas puede provocar sifonamiento.

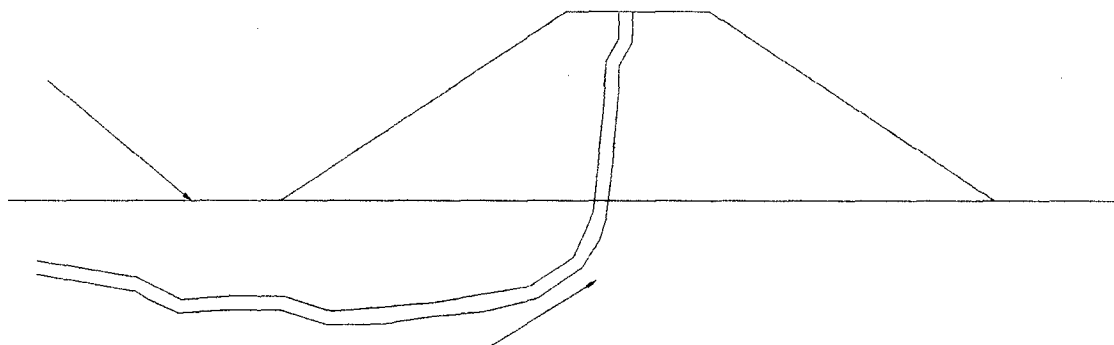
Si la presa o su cimiento fueran uniformes, las fuerzas estarían bien distribuidas, pero material de depósito es raramente uniforme e isótropo, y en la misma presa pueden producirse irregularidades por defectos de compactación o por otras causas que veremos. Si en cierta zona se produce un desequilibrio cuya tensión da lugar a una fisura, el paso del agua por ella hace más fácil la pérdida de carga (gradiente) disminuyendo en el trayecto de la fisura y en consecuencia aumenta en los tramos contiguos su velocidad y su poder erosivo. Si el resto del material resiste, el proceso se detendrá, pero en caso contrario se extenderá la fisura, recrudesciéndose cada vez más el desequilibrio y la probabilidad de su ampliación. Si otros lugares relativamente próximos hubieran sufrido fisuración, podrían llegar a juntarse las grietas y, una vez formado un conducto, el paso del agua lo ensanchará.

Las zonas más propensas a la iniciación de fisuras son las masas mal compactadas, contactos de la presa con obras de concreto (aliviaderos, conductos, etc.), bordes del núcleo, paramentos de las presas homogéneas no drenadas y zonas débiles o anómalas del sustrato. Estas últimas son más frecuentes, porque la presa puede tener algún defecto de construcción, pero en general no será importante, mientras que el terreno es en principio heterogéneo y anisótropo, y por ello más propicio a presentar zonas críticas.

Otro origen del sifonamiento puede ser un escape de agua de un conducto que atraviesa la presa. Otra causa similar son los manantiales, que llevan el agua al embalse o al exterior; si fueran detectados a posteriori, deberán controlarse por medio de un pozo o galería sacando el agua afuera o, si no fuese fácil, a un espaldón drenante, bajo la protección de un filtro.

El paramento exterior mal drenado es propicio a originar el sifonamiento, si está saturado en alguna zona, también el contacto del núcleo con el espaldón si no hay filtro intermedio o es inadecuado. En general, todos los lugares en que los finos húmedos no tienen obstáculo para su salida al exterior o a los huecos de otro medio de elementos más gruesos. En las presas homogéneas no drenadas. Los asentamientos diferenciales producen grietas o fisuras que pueden dar lugar al paso de agua.

La salida de agua barrosa por algún punto suele ser indicio de sifonamiento (salvo en el primer llenado en el que el barro puede proceder de la misma obra). En principio, toda variación de caudal filtrante o de color del agua, así como la localización puntual de la filtración, deben poner sobre aviso y hacer más intensa la observación para, eventualmente, tomar las medidas preventivas.



**Figura 3-19: formación de cráteres en una presa de tierra**

Cuando el material sifonado es arena fina, es frecuente que se forme una especie de cráter en la salida aguas abajo de la presa, normalmente de 0,5 a 1,0 m de altura, con orificio del orden de 10 centímetros o menos, y pueden ser varios o uno solo. Se suelen formar en suelos finos, sin cohesión, con gradientes de 0,5 a 0,8, por lo que conviene precaverse. Si se forman, debe taparse su salida con una capa de 1,0 a 1,5 m de altura de material con graduación variable, para que forme filtro invertido (el material más grueso arriba) y detenga el proceso de lavado. Si fueran varios cráteres próximos pueden englobarse en un manto común. Al taponar la salida, el filtro crea una contrapresión que disminuye el gradiente aguas arriba y frena la velocidad del agua. Pero hay que observar si



esto da lugar a una presión interna excesiva que pudiera producir el levantamiento del suelo u otra boca de salida.

La experiencia demuestra que en el sifonamiento tienen más influencia las propiedades del suelo que el método de compactación. Las arcillas con índice de plasticidad  $> 15$  tienen alta resistencia al arrastre, las de índice  $> 6$  resistencia media, y las menores de 6 tienen resistencia baja. Esto puede tenerse en cuenta al elegir el material de la presa, pero no es posible para el cemento, aunque conocida la tendencia pueden tomarse las precauciones adecuadas. De todas formas, se verá e insistirá en que con filtros eficaces tiene menor importancia la erosionabilidad del material.

Un tipo especial de arcillas lo constituyen aquellas llamadas dispersivas. En ellas, que normalmente tienen un contenido alto de cationes sódicos de intercambio, una filtración incontrolada por una fisura produce siempre un arrastre progresivo de sus partículas, aunque esta fisura sea muy pequeña. Estos cationes aumentan el espesor de la doble capa y hacen que las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas sean mayores que las fuerzas de atracción de Van der Waals. Estas arcillas se caracterizan por tener un nivel alto de ESP (exchangeable sodium percentage) y de SAR (sodium adsorption ratio). Existe un ensayo fácil, debido a *Railings*, el llamado *crumb test*, que permite calificarlas fácilmente (analizando el comportamiento de un terrón de material sumergido en una solución de hidróxido sódico) y, sobre todo, se emplea el llamado pin-hole de Sherard. La dispersabilidad parece depender también del PH del agua y de su contenido en sales.

Existe una forma especial de sifonamiento, cuando se produce una salida masiva de materiales inestables internamente, que los ingleses llaman sifusión. En general los fenómenos de sufusión son lentos y pueden detectarse con una vigilancia continua, pudiéndose controlar con un mantenimiento preventivo.

Existen tres tipos de sufusión: la interna, que consiste en un arrastre de las partículas finas contenidas dentro de un material que no es autoestable, la externa, que se produce en la interfase entre un material fino y otro grueso por

arrastre de las partículas del fino hacia los huecos del grueso, y la sufusión por segregación, donde se dan los dos tipos anteriores.

La estrecha unión funcional entre núcleo y filtro, hace que tratemos conjuntamente ambos en este capítulo. Comenzaremos por el análisis de las disfunciones en el núcleo y pasaremos después al estudio de la función del filtro, y las normas para su proyecto, y de nuevo volveremos a los núcleos para dar las orientaciones pertinentes sobre su constitución, dimensiones y detalles constructivos que sólo se pueden dar con el conocimiento de la seguridad que proporciona el filtro.

### **3.7.2 Fisuración de Núcleos**

El núcleo es el encargado de la impermeabilidad de la presa y la liberación de presiones en el espaldón aguas abajo, es un elemento delicado, pues sus características no sólo dependen del material, sino de la humedad y otras condiciones. Su diferencia con el resto de los materiales de la presa da lugar a deformaciones diferenciales, origen de tensiones y consiguientes fisuras, que erosionadas por el paso del agua, pueden llevar al sifonamiento, es posible que un gran número de los sifonamientos hayan tenido su origen en fisuras del núcleo.

Al igual que los sifonamientos las fisuras se producen sobre todo en presas simples, de pequeña altura (menos de 30 m), pero también se dan en las grandes y bien construidas. Se tiene la impresión general de que la fisuración es un efecto difícilmente evitable, dada la gran cantidad de causas que tienden a producirla.

Las fisuras pueden ser exteriores (visibles) o interiores, estas últimas más peligrosas por ignoradas o sólo discernibles por observaciones indirectas. Sus orientaciones y dimensiones pueden ser muy variadas, y pueden presentarse dispersas o concentradas en una sola.

Normalmente se producen en la parte superior de la presa, a partir de una cierta altura, por dos razones: primero, porque los movimientos diferenciales son más pronunciados en esa zona, segundo porque las tracciones producidas tienen en la parte baja el contrarresto de la compresión debida al peso. Por ese mismo motivo aparte del menor cuidado en la ejecución se dan más en presas pequeñas.

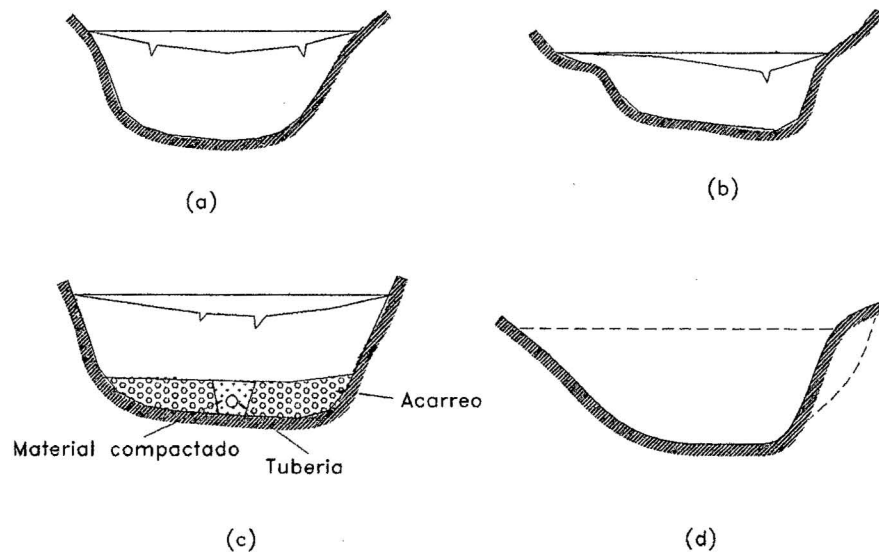
A continuación se analizan los distintos tipos de fisuras según su situación y orientación.

### **3.7.2.1 Fisuras Transversales**

Pueden ser verticales o inclinadas, en planos transversales a la corona. Son las más peligrosas, porque pueden llegar a poner en comunicación el embalse con el paramento aguas abajo.

Este tipo de grietas se forman en la coronación por asentamientos diferenciales en diferentes secciones a lo ancho de vaso o debidos a deformabilidades diferentes, que pueden tener varios orígenes:

- Con un cauce compresible y laderas rígidas (Figura 3.20a) o incluso en cauce en roca, debido al mayor asentamiento en el centro respecto a las laderas.
- Por diferencias de compresibilidad debidas a dos fases de la construcción.
- En cambios bruscos de pendiente de la ladera o debidos a obras abandonadas (caminos, excavaciones, etc.)
- Por efecto de obras de mayor rigidez, como galerías (c).



**Figura 3.20: Causas para la formación de grietas**

Si las grietas transversales son profundas, pueden crear un camino directo de filtración, cuando son relativamente superficiales, el riesgo sólo se da para niveles altos del embalse, con menos efecto y con la posibilidad de evitarlo con una bajada moderada hasta reparar las fisuras.

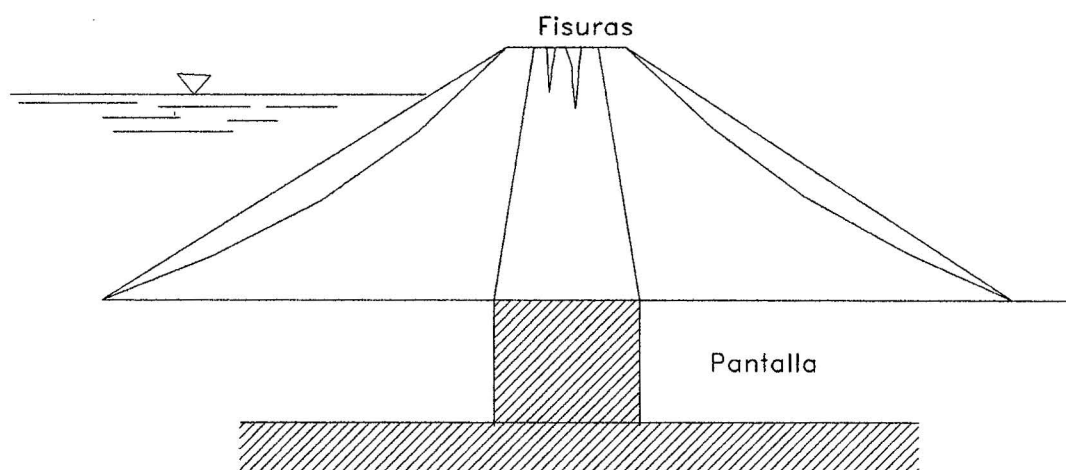
Las grietas deben repararse con un relleno debidamente estudiado para que sea estable y enlace con el material del núcleo. Suelen emplearse mezclas bien dosificadas de arena con arcilla y bentonita. Como las grietas suelen ser finas y difíciles de rellenar, conviene abrir una zanja que las incluya y siga para estar seguros de haber llegado hasta su extremo, y para hacer más fácil y eficaz su relleno, para el que a veces puede emplearse el material extraído con o sin otros añadidos, debidamente compactado en capas delgadas. Es recomendable dar una sección horizontal en cuña a la zanja para que la presión hidrostática tienda a asegurar su efecto. Es muy importante reconstituir también el núcleo, si hubiera sido afectado. La reparación exige la bajada parcial del embalse .

### 3.7.2.2 Longitudinales, Verticales o Subverticales

Son más o menos paralelas a la corona, en planos verticales o cercanos a esa posición. En principio son menos peligrosas que las transversales, puesto que no

ponen en comunicación el agua del embalse con el exterior; sí pueden serlo si inducen deslizamientos parciales que debiliten la zona o si cortan otras grietas transversales.

Cuando bajo el núcleo hay una pantalla de impermeabilización más rígida que el resto, el núcleo suele asentar menos que los espaldones, y se producen una grietas de despegue(Figura 3.20). estos se generan por deformaciones diferenciales de los distintos materiales en la superficie de contacto o un poco más al interior, por adherencia del núcleo a los espaldones.



**Figura 3.21 Formación de fisuras en la corona por asentamiento**

Su reparación es similar a la de las transversales, aunque más fácil, por su menor peligrosidad y menor afectación al núcleo y a los filtros. En tanto se reparan conviene precaverse ante la posibilidad de que penetre por ellas el agua de lluvia, que por presión interna podría provocar un deslizamiento parcial.

### 3.7.2.3 Fisuras Interiores, Horizontales y Verticales

Este tipo de fisuras son peligrosas, porque al no repercutirse exteriormente son difíciles de detectar. Su existencia suele notarse por la aparición de fugas de agua que no tienen explicación, o por un asentamiento en el núcleo, que hace pensar que está colgado y despegado del resto. Su comprobación sólo puede lograrse por medio de sondeos. Se sospecha que, en mayor o menor medida, se

forman en muchas presas aunque no se detecten, pero acaban cerrándose con un filtro adecuado.

Estas fisuras suelen ser horizontales y se forman en núcleos verticales coherentes por la diferencia de asentamientos entre el núcleo y los espaldones adyacentes. Al asentar un núcleo coherente, sus bordes quedan adheridos a las paredes contiguas y parte del núcleo queda colgado de ellas, gracias a que la cohesión permite un efecto arco (ver Figura 3.22a). Esta posibilidad es tanto más pronunciada cuanto más delgado sea el núcleo y disminuye mucho en núcleos inclinados, por el doble efecto de los menores asientos diferenciales y el peso estabilizador del agua sobre el paramento mojado.

Las fisuras horizontales sólo pueden producirse hasta cierta profundidad por dos razones: uno porque la diferencia de asentamientos va disminuyendo hacia abajo y otro porque la acción creciente del peso compensa las tracciones y contribuye al cierre de las fisuras.

Las fisuras horizontales pueden formarse por cambios bruscos de pendiente o de rigidez (Figura 3.22b), en vez de la fisura vertical de la Figura 3.19b especialmente en valles estrechos, en los que puede producirse un cierto efecto arco que mantiene la parte superior del núcleo apoyada en las laderas, mientras asienta la parte inferior.

Las fisuras verticales inferiores son más raras, pero pueden producirse cuando en el sustrato hay una zona más débil con asientos más pronunciados que el resto (ver Figura 3.22c).

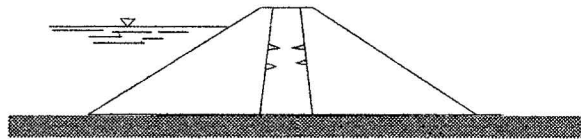
Pueden formarse grietas internas de varias direcciones en el contacto de un pantalla rígida de pilotes de hormigón en la base de una presa homogénea (Figura 3.22d) o de un núcleo grueso y en general, en el contacto con cualquier estructura más rígida.

En algunas; presas se han formado fisuras por fracturación hidráulica debida a inyecciones de tratamientos previos al comienzo de la obra, cuando la presión de

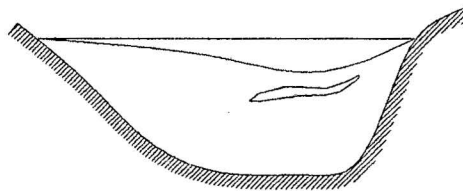
la inyección aun no tiene el contrarresto del peso. Por ello, cuando sean necesarias, debe limitarse en lo posible su presión y cuidar de que los orificios no dejen una comunicación directa del núcleo con el embalse. Las inyecciones a posteriori pueden ser más eficaces porque cuentan con el peso del dique que equilibra las tracciones producidas por la presión de inyección, aunque deberán guardarse también las precauciones necesarias.

### 3.7.3 Precauciones Contra la Fisuración

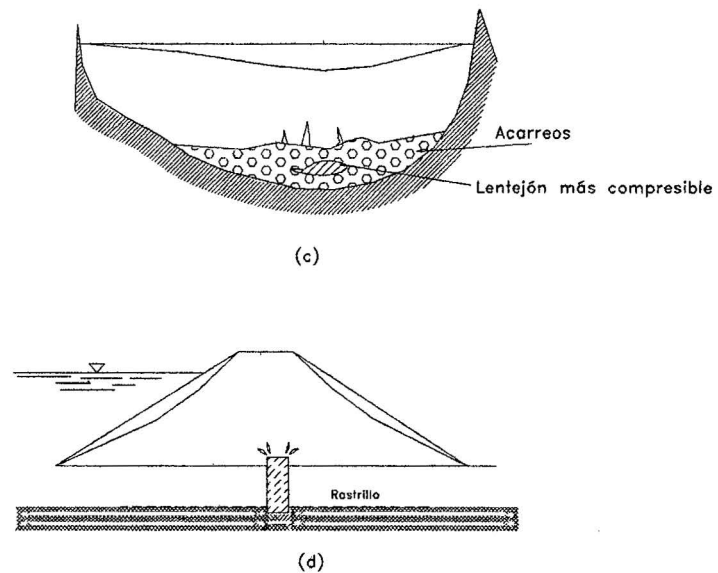
En vista de la multiplicidad de causas que pueden dar lugar a la fisuración, se ha formado el hábito de precaverse contra ellas, adoptando también múltiples medidas constructivas para establecer una serie de líneas de defensa que se aseguren mutuamente.



(a)



(b)



**Figura 3.22: Formación de fisuras verticales**

### 3.7.4 La Fracturación Hidráulica

El problema de la fisuración de las presas de materiales sueltos ha sido muy estudiado y se han aplicado numerosas y variadas soluciones para disminuir su importancia; sin embargo, desde el comienzo de su estudio el mismo Casagrande había descrito algunos accidentes próximos a la rotura en algunas presas en que no parecía poder estimarse que hubiera existido una fracturación previa debido a asentamientos diferenciales.

En un artículo publicado en 1973 por Sherard el autor opina que se había demostrado más allá de toda duda razonable que se habían producido fugas concentradas en presas de materiales sueltos a través de grietas que no se habían abierto antes de subir el nivel del embalse. Exponía Sherard que en algunos casos en que la fisuración previa no había llegado a producirse, podía existir una tensión principal menor muy pequeña. Al penetrar la presión del embalse, ésta podría abrir una fisura por tracción efectiva. Llamó a este fenómeno fracturación hidráulica. Su propio texto indica claramente y a ello responde la práctica habitual, que se compara la tensión total de antes de llenar el embalse, con la presión intersticial después de un cierto llenado, sin tener en cuenta que las tensiones totales reales variarán también con la subida del nivel de embalse. Con



este mecanismo podían justificarse algunos inexplicables, fenómenos que se venían observando en el comportamiento de algunas presas y que consistían en lo siguiente:

- Filtraciones concentradas, que aparecen pronto, durante el primer llenado del embalse, a través de presas homogéneas, bien construidas, pero sin drenajes internos y que a menudo conducen a la rotura de la presa.
- Filtraciones acompañadas de erosión, a través del núcleo central de presas construidas con filtros inadecuados, que suelen coincidir con una subida rápida de nivel en uno de los primeros embalses.
- Medida de presiones piezométricas de magnitud casi igual a la del embalse en la zona del núcleo próxima a su paramento de aguas abajo. Las perforaciones que se han hecho para confirmar estas medidas han comprobado su existencia, haciendo sospechar la presencia de fisuras más o menos horizontales en conexión con el embalse. Estas presas permanecían seguras gracias al eficaz funcionamiento de sus filtros.
- Descubrimiento de capas húmedas dentro del núcleo de algunas presas con contenido de agua mayor y una densidad menor que la de colocación, lo que no podía justificarse por otros mecanismos.

G. Bravo ha puesto en duda este mecanismo, pues las tensiones totales crecen durante la subida del embalse de forma que se hace muy improbable que pueda producirse una fisura por tracción efectiva, y ha propuesto un nuevo mecanismo de lo que puede ser la fracturación hidráulica. Supongamos que empieza a subir el nivel del embalse y que el agua empieza a mojar nuevos elementos. El agua penetrará más rápidamente por los elementos más permeables; algunos de ellos empezarán a saturarse antes. La presión del embalse se transmite con mucha mayor facilidad por los elementos saturados, que por los que no lo están y esta presión intersticial mayor, actuando sobre las vías preferenciales de filtración, disminuirá la compacidad de los elementos en presión y tenderá a hacer menos permeables y quizá a saturar en parte también a los elementos aún no saturados. Una vez que las vías preferenciales de filtración hayan llegado al paramento de aguas abajo, se irá llegando a una distribución de presiones más o menos

triangular. Si existe aguas abajo un filtro adecuado y el material del núcleo es autoestable, la filtración continuará en el estado reducido en que nació sin aumentar, por no haber lugar a arrastre ni migración de partículas. En caso contrario puede llegarse a colapsar la estructura. Se ha construido un modelo matemático que justifica la posibilidad de la teoría:

- Que la fracturación hidráulica, así concebida, se produce durante los primeros llenados, cuando el núcleo no está aún saturado, y que depende de la velocidad de subida del nivel del embalse que llegue o no a producirse.
- Que no se produce si el núcleo está saturado.
- Que puedan encontrarse en los sondeos algunas zonas húmedas y descomprimidas.
- Que puedan encontrarse también presiones próximas a las del embalse cerca del paramento aguas abajo del núcleo, en las vías preferenciales de filtración
- Si las vías preferenciales de filtración alcanzan el paramento aguas abajo del núcleo y allí no encuentran un filtro adecuado, puedan producir la rotura por sifonamiento hacia los espaldones.
- Que si estas vías encuentran un filtro adecuado, que impida la migración de partículas, se acabe reconstruyendo el diagrama triangular de presiones, manteniéndose segura la presa.
- En el modelo matemático construido para comprobar la teoría, se prueban gradientes reales muy superiores a los promedios.

## **3.8 FILTROS**

### **3.8.1 Antecedentes**

La función de filtro se percibió pronto como paso intermedio entre dos suelos de granulometrías muy distintas, pero su diseño se hacía según reglas del arte muy empíricas, basadas en la experiencia, que era corta y limitada hasta el primer cuarto de este siglo.

Terzaghi fue el que formuló el primer planteamiento racional sobre los filtros (1922), sobre la base de dos principios:

- Los huecos del filtro deben tener la amplitud suficiente para que pase el caudal necesario para rebajar el exceso de gradiente hidráulico (criterio de permeabilidad).
- A mismo tiempo, los espacios entre granos del filtro deben ser suficientemente estrechos para impedir la trasmigración de los finos del suelo adyacente (criterio de no sifonamiento).

Planteados estos dos principios (hoy muy claros, pero gracias a ese criterio de enunciación inicial), se desarrollaron en los años siguientes una serie de ensayos que fueron concretando su realización práctica.

Los más completos que dieron lugar a unos criterios que en gran parte, con ciertas modificaciones, han permanecido hasta hace poco, fueron los realizados por Bertram, con la asistencia de Terzaghi y Casagrande en la Universidad de Harvard, en 1938-1939. En otras partes se realizaron también ensayos, con la experiencia recogida de las obras las cuales dieron lugar a una serie de normas adoptadas por las más importantes entidades, con ciertas diferencias entre ellas, pero con una cierta base común.

La experiencia acumulada hasta la fecha en miles de presas construidas y los ensayos de laboratorio han llevado a un perfeccionamiento de las reglas hasta ahora vigentes. Entre los ensayos destacan por recientes y completos los realizados entre 1983 y 1988 por el Soil Conservation Office (Estados Unidos), bajo la dirección de L. P Dunningan y I.L. Sherard, de las cuales se han obtenido unas normas más precisas.

Por otra parte, y simultáneamente con los ensayos y normas empíricas, se han desarrollado desde hace unos veinticinco años unos estudios teóricos, llamados fundamentalistas, en los que se enfoca directamente el problema de los huecos del filtro sobre una base geométrica con criterios determinísticos o probabilísticos.

Par último, la aparición hace unas dos décadas de los filtros sintéticos (cerámicas y textiles) ha introducido otra técnica, aun no del todo consolidada, pero que puede ser prometedora. En los geotextiles, que son los de mayor aplicación a presas, no hay granos, sino una trama, y son sus orificios los que directamente influyen en su comportamiento. La dificultad de su medición es el principal impedimento para la normalización de su uso y, como consecuencia, para que éste se extienda. Tanto los textiles como los cerámicos son prefabricados y resistentes, es decir autoestables.

### 3.8.2 Principios Generales

Hasta ahora nos hemos referido al filtro como elemento adjunto a un núcleo o al material de una presa homogénea, pero su utilidad es más general, en principio, el filtro es un elemento intermedio entre un suelo más fino y otro más grueso, cuando la diferencia de granulometrías es tal que los granos más finos del primero pueden emigrar a través de los huecos del segundo, poniendo en riesgo la integridad de esta. En general, llamaremos suelo protegido a suelo base al de granulometría más fina que puede ser un núcleo, espaldón homogéneo o cualquier otra zona de la presa o de su cimentación.

Los filtros que están en la ruta de la filtración, es decir son atravesados por líneas de flujo con componentes que tienden a favorecer la migración de finos, se llaman filtros críticos, porque su falla repercute directamente en la estabilidad de la presa, y son los más importantes y frecuentes. Otros que están en zona exenta de filtración o en la que está no tiene componentes que refuercen la posible migración, o que sólo actúan circunstancialmente, se llaman no críticos.

Es filtro crítico es el que esta aguas abajo del núcleo y no crítico el de aguas arriba, porque aunque es necesario para contener los finos del núcleo, la tendencia de éstos a emigrar hacia agua arriba sólo se produce al bajar bruscamente el embalse, con gradientes mucho menores que los de la filtración normal hacia agua abajo y además, en dirección opuesta, con repercusiones más moderadas en la estabilidad y con duración limitada y circunstancial. En un drenaje en L en una presa homogénea (ver Figura 3.23) serían críticos el filtro

vertical a subvertical aguas arriba del dren chimenea y el horizontal inferior, porque ambos tienen una componente normal de la filtración, a través de la presa y del cimientado. En cambio, no lo serían los filtros aguas abajo del dren chimenea y encima del horizontal, si fueran necesarios para impedir el paso por gravedad entre elementos del drenaje y el espaldón y, en general, cualquier filtro en una presa heterogénea interpuesto entre dos materiales distintos en fuera de la zona de la filtración.

Esta distinción es importante, porque los filtros no críticos se proyectan con criterios menos exigentes que los críticos.

Para cumplir eficazmente su función, el filtro debe tener las siguientes propiedades:

- Tener una permeabilidad mayor que el suelo al que protege.
- Ser estable, debe impedir el tránsito a través de él las partículas del suelo base.
- Ser autoestable, lo que se traduce en que tampoco sus propias partículas puedan emigrar hacia fuera.

La permeabilidad del filtro debe ser, Como mínimo, unas 20 veces superior a la del suelo base y mejor 50 ó más. Para ello conviene exigir una relación  $D_{15}/d_{15}$  mayor que 4 a 12, según distintos autores.

Si imaginamos un filtro tal que el tamaño de su hueco máximo fuera menor que el elemento más fino del suelo base, es obvio que sería imposible el paso de elementos de éste a través del filtro; éste tendría una probabilidad de fallo nula. Por el contrario, si el elemento más grueso del suelo fuera menor que el hueco más estrecho del filtro, todo el material del primero podría emigrar a través del segundo (si se le diera tiempo y gradiente suficientes) y la probabilidad de fallo sería del 100 %.

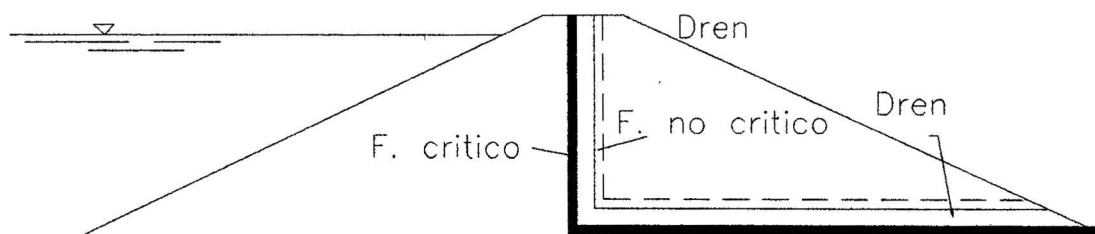
Los filtros reales tienen unas granulometrías variadas, y su comportamiento está entre ambos extremos (más cerca del primero). En realidad, no se puede impedir que algunas partículas más finas del suelo encuentren algunos huecos algo

mayores del filtro y penetren por ellos, pero si el filtro está bien concebido, al cabo de un corto recorrido la probabilidad de encontrar una obstrucción es grande, y las partículas acabarán deteniéndose; otras partículas que en principio podrían haber encontrado paso, lo tendrán ahora más difícil, porque las anteriores habrán ido cerrando los huecos primitivamente existentes, y el paso de partículas será cada vez menor, hasta desaparecer, por el doble motivo de haberse agotado las menores y ser cada vez menor la probabilidad de encontrar un hueco. Este proceso convergente depende de la probabilidad de encontrar huecos, lo que a su vez, es función de las granulometrías de ambos medios, se comprende que una adecuada elección del material en este proceso disminuye. En ese momento queda estabilizado el filtro y formada una capa intermedia, o interfase, con la mezcla del filtro original y los elementos procedentes del suelo (Figura 3.24). Esa capa debe ser de un espesor moderado (un pequeño porcentaje del total del filtro) y constituye una especie de prefiltro que se forma automáticamente. Si el filtro no estuviera bien concebido y esta capa llegara a ocupar todo su espesor, no sólo resultaría inestable, sino que podría llegar a la obstrucción o taponamiento, perdiendo además otra de sus cualidades que es la función drenante.

Conocido el funcionamiento de un filtro y las propiedades exigibles, el problema es como conseguirlo. Esto puede enfocarse desde dos puntos de vista:

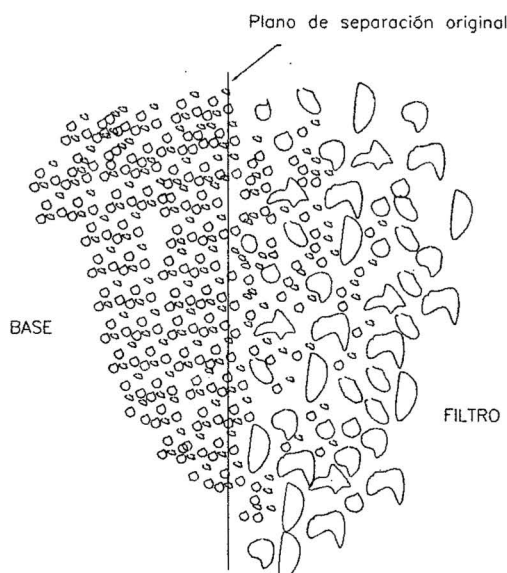
- Por procedimientos empíricos, basados en la experiencia en obras realizadas y en ensayos específicos de laboratorio.
- Con estudios teóricos, basados en la estructura geométrica y reparto estadístico de los granos del filtro, asimilados a esferas.

Por el momento los filtros se proyectan empíricamente de forma casi exclusiva. Los métodos teóricos o fundamentalistas son más bien un prometedor punto de partida que podrán llegar a extrapolar los resultados experimentales gracias a la capacidad de las modernas herramientas de cálculo, actualmente su uso es bastante restringido solo como un complemento de las reglas empíricas.



**Figura 3.23: Tipos de filtro**

El principio general de que la ciencia o la técnica que no se apoya en la experiencia es errónea o defectuosa, en los problemas de las presas de materiales sueltos rige con una fuerza imperativa de momento, casi absoluta. Por ello dedicaremos la debida atención a las experiencias practicas y a las normas que de ellas han resultado, y después daremos un resumen de los métodos fundamentalistas.



**Figura 3.24: Contacto entre el filtro y un material mas fino**

### 3.8.3 Ensayos en Laboratorio

El punto de partida de las normas actuales sobre filtros es la experiencia mundial de muchos años en miles de presas y ensayos, que han llegado a una mayor precisión gracias a los recientes del Soil Conservation Service (SCS) antes citados.

En líneas generales y prescindiendo de detalles de procedimiento, los ensayos se han realizado de la siguiente forma: la muestra de suelo base, con las condiciones de humedad y compactación previstas o realizadas en la obra (según se trate de ensayo para proyecto o de comprobación), se dispone en la parte central, con la muestra de filtro debajo y agua encima. Esta se somete a la presión necesaria (en general 4 kg/cm<sup>2</sup>) para que la muestra de suelo esté sometida al gradiente establecido para la prueba. En la muestra de suelo se perfora un orificio cilíndrico de 2 mm de diámetro que la atraviesa en todo su espesor y que da un camino preferencial al agua de manera similar a una grieta; la función de este orificio es observar y comprobar el efecto del filtro en el autosellado, que es uno de los objetivos del ensayo.

En el SCS se han ensayado durante cinco años muestras de suelos de muy diversa constitución y granulometría, y para cada una se han probado diversas composiciones de filtros, hasta conseguir el resultado deseado. La prueba se daba como positiva cuando la proporción de material de suelo perdido (pasado a través del filtro) era mínima y cuando, además, se conseguía la desaparición por sellado del agujero de la muestra. Obtenido un resultado satisfactorio, se disminuía la exigencia granulométrica del filtro para fijar el límite en que ya dejaba de ser estable. Esa granulometría crítica sirve de referencia para establecer la que debe adoptarse como norma, con un coeficiente de seguridad. La sensibilidad varía mucho según el tipo de áridos, por lo que para que en todos los casos se tenga una seguridad similar, el criterio sobre la granulometría deseable varía de uno a otro tipo. El coeficiente de seguridad es en realidad más amplio del que resulta de esta consideración, pues los ensayos se han llegado a realizar con gradientes más fuertes que los reales.

#### **3.8.4 Normas Para el Proyecto de Filtros**

Las condiciones físicas que deben cumplir los filtros dependen del diámetro de los finos del suelo base y del tamaño de los huecos del filtro, pero éstos son difíciles de medir, por lo que tanto los resultados de los ensayos como las normas sobre filtros se han basado siempre en las granulometrías de suelo y



filtro, que implícitamente traducen el tamaño de los huecos de una forma más práctica de medir y evaluar.

Desde las primeras normas sobre filtros se ha visto que el parámetro más significativo es el diámetro D15 de las partículas del filtro que son iguales o menores que el 15 % del total. Otro parámetro es el diámetro d85 de las partículas del suelo base, iguales o menores que el 85 % del total. Y basada en ambos parámetros, se dio la condición  $D15/d85 < 5$ . A esta condición se añadían, otras relativas a otras proporciones del suelo base, variables según los organismos o países. El diámetro D se refiere al filtro y d al del suelo base.

La experiencia acumulada de varios años ha confirmado en líneas generales esas normas, salvo en algunos tipos de suelos. Las que vamos a dar algunos detalles, manteniendo como parámetro fundamental el D15, pero matizando la relación D15/d85, que varía de 4 a 9, según los suelos.

Estas normas han sido aceptado por el Comité de Filtros de la Asociación Internacional de Mecánica de los Suelos, por lo que su uso se extenderá. Eso no se opone a que la experiencia vaya añadiendo eventuales matizaciones o retoques, pues nada es fijo ni inmutable en tecnología, cuya esencia es el progreso.

Estas normas dependen únicamente del tamaño de los granos, y son independientes de la plasticidad del suelo; incluso no influye el potencial dispersivo, lo que les confiere una gran generalidad.

Cuando los suelos impermeables incluyen gravas, éstas no deben tenerse, en cuenta en el cálculo, y las normas se aplicaran sólo a los materiales que pasan por el tamiz 4, excepto para los suelos del grupo 3, cómo se advertirá.

Para aplicar estas normas o criterios se han dividido los suelos en cuatro tipos, ordenados en general de más finos a más gruesos, pero invirtiendo los dos últimos por razones de procedimiento. El orden real de tamaño es 1-2-4-3, porque el 4 es intermedio entre los 2 y 3, y el criterio también lo es; el orden 1-2-3-4 traduce el de exposición de criterios y no el de tamaños.

En todos los casos se parte del tipo del suelo base y se dan las normas granulométricas que debe cumplir el filtro. Este debe componerse de materiales sin cohesión.

- **GRUPO 1: Arcillas y limos finos**

Son los suelos que tienen más del 85 % de materiales que pasan por el tamiz 200. El filtro ha de cumplir la condición

$$D_{15} \leq 9d_{85}$$

- **GRUPO 2: Arcillas o limos arenosos y arenas arcillosas o limosas**

Son los suelos con un 40 a un 85 % más fino que el tamiz 200. El filtro debe cumplir la condición

$$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$$

En estos suelos predomina la influencia de los finos en las pruebas sobre filtros, y no influyen las partículas de arena.

Los criterios para los grupos 1 y 2 suponen filtros totalmente compuestos de arenas o gravas arenosas, con predominio de la porción arenosa, para que las gravas no causen segregación durante la obra. A estos efectos, la grava arenosa, más gruesa debe tener más del 40 % de arena (menor que el tamiz N° 4) y un tamaño máximo de grava de 50 mm.

- **GRUPO 3: Arenas y gravas arenosas impermeables con bajo contenido de finos**

Son suelos con menos del 15 % más fino que el tamiz 200 de la norma A.S.T.M. (0,074 mm). El filtro debe cumplir la condición

$$D_{15} \leq 4 d_{85}$$

En este caso, cómo ya se advirtió, el criterio debe aplicarse a la totalidad del suelo, sin excluir las gravas.

En los ensayos se ha llegado a diámetros  $D_{15} = 30$  mm, pero los autores creen que la regla se puede aplicar a filtros aun más gruesos.

- **GRUPO 4: Suelos intermedios entre los grupos 2 y 3**

Son los que dan entre el 15 y el 40 % de elementos que pasan por el tamiz 200.

El filtro ha de cumplir también unas condiciones intermedias, que pueden obtenerse por interpolación lineal. Si  $p$  es el porcentaje de elementos que pasan por el tamiz 200, ha de tenerse:

$$D_{15} \leq \frac{40 - p}{40 - 15} (4d_{85} - 0.7) \quad (\text{mm})$$

Los cuatro grupos de suelos incluyen todos los usuales en las partes impermeables de las presas de materiales sueltos. Para los grupos 1 y 2 las normas se aplican con independencia de la forma de la curva granulométrica. Para los 3 y 4 se aplican a suelos con una curva de distribución razonablemente graduada; cuando ésta presenta fuertes discontinuidades, es aconsejable dimensionar el filtro para la porción más fina de la curva, o bien hacer ensayos directos en laboratorio con el suelo en cuestión, para definir el filtro idóneo.

### 3.8.5 Estabilidad Interna del Filtro (Autoestabilidad)

En 1975 De Mello propuso una prueba para comprobar la autoestabilidad de un filtro: dividir la curva de distribución del material en dos partes arbitrarias y tratarlas como si la más fina (F) fuera un suelo base y la más gruesa (G) un filtro y exigir a la relación de ambas el coeficiente de uniformidad máximo 5:

De Mello aplicaba el método a suelos discontinuos, pero Sherard extendió su aplicación a los continuos y propuso (1981) una aplicación más amplia a toda la curva granulométrica, en la forma siguiente:

$$I_R = \frac{D_{15}(G)}{D_{85}(F)} < 5$$

La relación  $I_R$  se llama coeficiente de estabilidad interna.

Esa condición ha de cumplirse en toda la curva granulométrica sea cual fuere el punto de separación arbitraria en dos mitades (fina y gruesa). Elegido un diámetro de separación  $DX$  al que corresponde un  $X$  % de elementos mas finos que él, es inmediato obtener el diámetro  $DY$  tal que  $Y = 0.85X$  y  $DZ = D(X + 15)$  y comprobar si se cumple la relación:

$$I_R = \frac{D_{15}(G)}{D_{85}(F)} = \frac{D(Y + 15)}{DY} < 5$$

El ensayo se repite para varios puntos  $X$  de la curva y se comprueba si el índice de estabilidad cumple la condición impuesta. Puede hacerse la comprobación con intervalos de 5% sistemáticamente y recoger los resultados en una tabla. Si para algunos tamaños no se cumpliera, habría que corregir la granulometría.

De acuerdo con este criterio la cola más fina es con frecuencia inestable; por ello el U.S. Bureau of Reclamation y el U.S. Corps of Engineers recomiendan que un filtro no contenga mas del 5 % de elementos mas finos que 0,074 mm (tamiz 200).

### 3.8.6 Ensayos en Obra

Todas estas normas facilitan la obtención de un filtro autoestable y adecuado al suelo que se desea proteger, pero la mejor garantía de la eficacia de un filtro son los ensayos con el material que se va a emplear. Este se selecciona con las normas, pero éstas dejan un cierto campo de elección, además como tienen un margen de seguridad, en ciertos casos pueden hacerse reajustes si lo aconseja el material disponible y los ensayos confirman su idoneidad

Además de ensayar la autoestabilidad del filtro aisladamente con pruebas de filtración, es muy deseable realizar las pruebas de estabilidad con el suelo, incluidas las de autosellado de éste en una muestra agujereada.

### 3.8.7 Espesor de los Filtros

El espesor de un filtro viene determinado por las siguientes condiciones:

- El necesario para cumplir su función, de forma que la interfase de penetración inicial ocupe sólo una proporción reducida del espesor.
- Un margen añadido para prever la pérdida de espesor eficaz en los bordes por mezcla con los materiales adyacentes al ejecutarlo y por el paso de la maquinaria de compactación.
- En los verticales o subverticales, el ancho horizontal mínimo para que pueda trabajar la maquinaria de compactación.

En los filtros verticales o subverticales la última condición predomina ampliamente sobre la primera, e incluye ya el margen de la segunda, lo que lleva a anchos horizontales del orden de 2,50 a 3,00 m. Los horizontales son más fáciles de colocar y compactar, la tercera condición no opera, salvo en capas muy cortas; la condición funcional estricta se cumple con espesores del orden de 10 cm para arenas y 13 para gravas, pero en general se usan espesores superiores para mayor seguridad y tener en cuenta el margen de pérdida en los contactos superior e inferior.

### 3.8.8 Franja de Arena Aguas Arriba del Núcleo

Era bastante usual colocar una capa de arena junto al paramento aguas arriba del núcleo en su parte superior (propicia a fisuración) para que sirva de depósito, alimentador de arena que penetre en fisuras, para taponarlas. El espesor suele ser de 2 a 4 m y el tamaño de los granos 1mm, aunque en algunos casos se ha llegado hasta 6 y 12 mm, con el objeto de permitir el relleno de grietas grandes.

Esta capa arenosa es una especie de filtro al revés, puesto que no está para detener los finos, sino para penetrar en las fisuras del núcleo. Esta técnica está sometida a discusión. Las ventajas son las arriba dichas. Los opositores aducen que, aparte de añadir una complicación constructiva, su eficacia es dudosa,

porque la velocidad de filtración es muy pequeña e incapaz de arrastrar las partículas de arena; por otra parte, ésta, si llega a penetrar, puede hacer de cuña y mantener abierta la grieta sin llegar a taponarla, con efecto contraproducente.

### 3.8.9 Compactación de los Filtros

Todos los ensayos de Sherard se hicieron con filtros compactados del 80 al 90 % de la densidad máxima. Se realizaron ensayos de la permeabilidad de estos filtros y se encontró que podía expresarse por la fórmula.

$$k = 0,35(D15)^2$$

Donde  $k$  es la permeabilidad en cm/s con  $D15$  expresado en mm. Con filtros menos compactados la permeabilidad aumentó hasta dos o tres veces más, que hay que suponer que un filtro flojo permitiría el paso de partículas de diámetro 1.5 mayor que un filtro denso.

La compactación de los filtros y del material de drenaje debe ser la adecuada para producir la densidad suficiente para prevenir la licuefacción, limitar la consolidación y dar una resistencia aceptable. La compactación excesiva puede producir rotura de partículas y reducir la permeabilidad.

### 3.8.10 Filtros Sintéticos

Hasta ahora nos hemos referido a los filtros llamados naturales, esto es, compuestos por áridos. En los últimos años han comenzado a emplearse unos filtros artificiales, sintéticos, formados por materiales cerámicos o textiles. Estos últimos, en la forma de geotextiles, son los mas usados, aunque por ahora, en presas de materiales sueltos, sólo Para obras complementarias y detalles de construcción, y minoritariamente.

La estructura de un filtro geotextil es la opuesta a la del filtro natural, aunque el efecto sea similar. el filtro natural está compuesto de granos sueltos y los huecos resultan de los espacios entre ellos; los geotextiles son entramados que se fabrican con los huecos necesarios en las tramas.

Los filtros sintéticos representan una tecnología prometedora, pero todavía no dominada y, sobre todo, aun no suficientemente experimentada y normalizada. La base de unas normas empíricas es que están basadas en una larga y extensa experiencia que permita aceptarlas con un cierto consenso al menos mayoritario en sus líneas generales, como ocurre con las que se aplican a los filtros naturales, aunque con ciertas variantes, según los países o las entidades. Por el contrario, en los filtros sintéticos no hay aun experiencia suficiente y como son productos fabricados, las normas son muy dispersas y de carácter individual. según el fabricante, sin siquiera una base elemental de consenso.

Una de las razones de esa dispersión de resultados es que en los geotextiles hay que conocer el tamaño de los poros de la trama, que son los que influyen en la retención de finos, y que son difíciles de medir y normalizar. En los filtros naturales la dificultad de medición de los poros se resuelve añadiendo a la granulometría, que los mide indirectamente. Pero en un entramado, hay que conocer directamente los huecos de la trama. Para ello se utilizan ensayos directos y microfotografía. Pero esos ensayos se realizan de manera muy diversa por los fabricantes o los usuarios, sin una norma común, por ahora.

## CAPITULO 4

# ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

### 4.1 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

#### 4.1.1 Introducción

En los últimos años la existencia y rápido desarrollo de la capacidad de ordenadores matemáticos ha permitido dar un enfoque numérico a diversos problemas de ingeniería mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos. Este método permite hacer un modelo matemático con el cual se puede reproducir todos los detalles deseados de una estructura. El modelo matemático no suplanta al mecánico; ambos métodos se complementan mutuamente en casos importantes. Pero en gran parte de problemas es suficiente el modelo matemático, que es en principio más sencillo y económico y que tiene la gran ventaja de que una vez programada, dispone de una gran flexibilidad para hacer múltiples modificaciones e incluso un cambio de hipótesis.

#### 4.1.2 Desarrollo del Método de los Elementos Finitos

El método de los elementos finitos fue desarrollado inicialmente por Turner et al. en 1956 aplicado a estructuras aeronáuticas, el cual fue aplicado a Presas por Zienkiewicz y Cheung en 1964 que es la base para su aplicación en todo tipo de estructuras. El método se basa inicialmente en elementos triangulares que permiten una mejor adaptación a todo tipo de formas, pero con el tiempo a otros elementos cuadrangulares e incluso a elementos curvos que se adaptan mejor a ciertos contornos. Inicialmente el método fue desarrollado en dos dimensiones pero después ganó generalidad y es aplicado en tres dimensiones. Y como las bases matemáticas con la cual fue desarrollada son comunes a varios campos físicos, permite su aplicación a múltiples problemas: todo tipo de estructuras (macizas, en barras, láminas, etc.), macizos rocosos (anisótropos o con fallas y



anomalías), flujo hidráulico, magnetismo y campos eléctricos, y en general a todo tipo de medios continuos o discontinuos.

El método se basa en la descomposición del campo en elementos geométricos (triángulos, cuadrángulos, tetraedros, paralelepípedos, rectos y curvos) suficientemente pequeños para que sea admisible la aproximación del continuo. En cada elemento se plantean las ecuaciones de equilibrio interno bajo las condiciones de contorno.

### **4.1.3 Planteamiento del Método**

#### **4.1.3.1 Descripción**

La aplicación de la técnica de los elementos finitos consiste en ejecutar los siguientes pasos, en forma secuencial:

- El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en una serie de subconjuntos llamados elementos finitos.
- Se supone que estos elementos están conectados entre sí mediante puntos denominado nudos y lados del elemento
- Se plantean las condiciones de borde de acuerdo al tipo de análisis que se está desarrollando.
- Se plantean las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico el cual se está modelando. Esto se realiza para cada elemento en forma independiente.
- Se resuelve el sistema de ecuaciones originados en el paso anterior.

#### **4.1.3.2 Mallado**

Un buen procedimiento de análisis por el método de elementos finitos, es partir de un modelo sencillo y ver que los resultados que arroje el análisis sea un resultado coherente con los resultados que se puedan obtener de un cálculo

mecánico. Los criterios generales a seguir para la generación de la malla de elementos finitos son:

- La malla de elementos finitos diseñada deberá adaptarse lo más posible al contorno de la estructura.
- Las zonas de mayor contraste en comportamiento al fenómeno analizado deberán mallarse de una forma más fina.
- Los elementos finitos transmiten información exclusivamente a través de los nodos. Dos elementos que no tengan nudos comunes son elementos disjuntos.

#### 4.1.3.3 Performance del Método

La cantidad de memoria de la computadora para el almacenamiento y tiempo de procesamiento necesario para resolver las ecuaciones de elementos finitos es proporcional al número de nodos, a la diferencia entre los puntos nodales y el orden de integración. La diferencia entre puntos nodales puede minimizarse generando los elementos en filas horizontales y columnas verticales.

La exactitud de los resultados también es afectada por la forma y tipo de elementos. Por consiguiente, se debe tener especial cuidado en la generación de la malla de elementos finitos.

Un buen método para generar un equilibrio entre la facilidad y la eficacia de los resultados, es la de tomar especial atención en la generación de la malla.

La forma de los elementos afecta también los resultados. Por ejemplo para elementos cuadriláteros se consigue un mejor comportamiento cuando los ángulos interiores son todos 90 grados; para elementos triangulares cuando los ángulos interiores son 45 y 90 grados; sin embargo el comportamiento de los elementos se deteriora rápidamente cuando un ángulo interior se acerca a 0° o 180°. En el caso de elementos cuadriláteros los ángulos cercanos o mayores a 180 grados son inaceptables.

En elementos cuadriláteros la proporción entre el ancho y el alto del elemento influye en la precisión de los resultados, cuando se tienen elementos alargados con elementos de ocho nudos y un orden de integración de orden nueve arrojan mejores resultados; una proporción entre los lados mayor que cinco puede llevar a resultados muy pobres.

#### 4.2 FUNCIÓN VOLUMETRICA (contenido de agua)

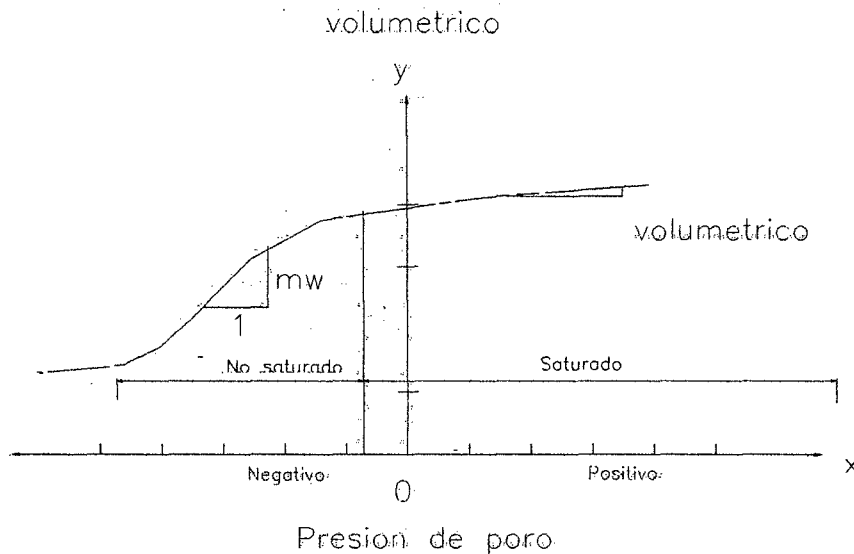
El principio para la formulación de un análisis general de filtración es comprender la relación entre la presión de poros y volumen de agua. Como en el proceso de flujo de agua a través de un suelo, se retienen ciertas cantidades de agua dentro de la estructura del suelo. La cantidad de agua retenida es una función de la presión de poros y las características de la estructura del suelo. Para un análisis de la filtración, es conveniente especificar la porción del flujo retenida, como una proporción del volumen total. Este volumen está dado por la ecuación:

$$Q = V_w / V \quad (4.1)$$

Donde:

- Q : Contenido de agua
- V<sub>w</sub> : Volumen de agua
- V : Volumen total

El contenido volumétrico de agua (Q) es función de la presión de poro. La Figura 4.1 ilustra esta relación que también es conocida como la función característica suelo-agua (Fredlund D.G. y Rahardjo, H, 1993).



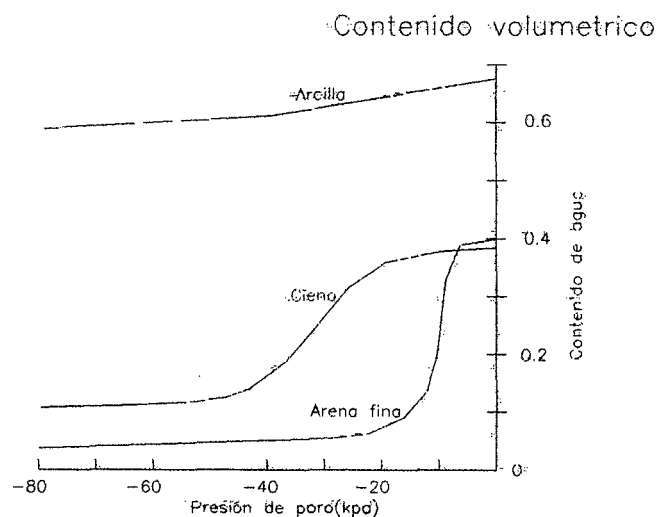
**Figura 4.1: Forma general de la función volumétrica**

Cuando el grado de saturación es 100%, los valores de contenido volumétrico son equivalentes a la porosidad del suelo que se define como el volumen de vacíos dividido por el volumen total.

Considere un suelo completamente saturado donde la presión de poro es cercana cero, y la carga externa total en el suelo permanece constante. Cuando la presión de poro crece tomando un valor positivo, la tensión efectiva disminuirá. Esto causa en los suelos un aumento en el volumen de agua. Cuando la presión de poros se pone negativa, el suelo empieza a desaturarse y el agua disminuye. Finalmente, el suelo se vuelve completamente desaturado, y el volumen de agua ya no cambia con una disminución extensa en el valor de la presión de poros.

La pendiente de la curva característica suelo-agua ( $m_w$ ) representa la proporción de cambio en la cantidad de agua retenida por el suelo en respuesta a un cambio en presión de poros. Cuando la presión de poro es positiva, el  $m_w$  es equivalente al  $m_v$ , el coeficiente de compresibilidad para la consolidación unidimensional. El parámetro  $m_w$  es requerido en un análisis de la filtración transitoria.

Las funciones características suelo-agua para suelos de grano fino (arcilla) pueden ser relativamente llanas, mientras para los suelos de grano grueso (arena) la función puede ser bastante empinada. La Figura 4.2 presenta los valores reales de la función característica obtenidas por Ho, 1979, para arena fina, cieno, y arcilla. La variación en estas curvas se muestran en las funciones características de algunos materiales las cuales se presentan en las Laminas 4-01 al 4-05.



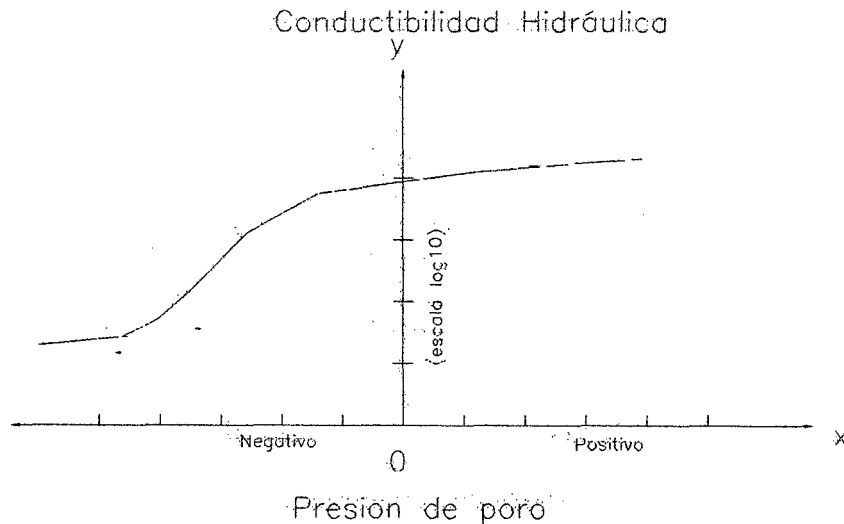
**Figura 4.2: Funciones reales de contenido de agua para arcilla, arena y cieno arenoso**

### 4.3 FUNCIÓN DE CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA

Puede considerarse que el agua en estado líquido fluye a lo largo de conductos continuos interconectados. Si disminuimos el volumen de agua se produce el efecto de disminuir el tamaño y número de canalizaciones y se reduce la capacidad de transmitir agua a través del suelo. Finalmente, cuando el suelo está seco, la capacidad de transportar agua a lo largo de los conductos continuos desaparece. Cuando el suelo se satura, todas las canalizaciones disponibles se utilizan, la capacidad de conductibilidad hidráulica está en un máximo.

Puede verse la capacidad del suelo de dirigir agua en términos de conductibilidad hidráulica (Coeficiente de Permeabilidad). En este contexto, la

conductibilidad hidráulica es dependiente del valor de la función volumétrica, puesto que el valor de la función volumétrica es una función de la presión de poro y la conductibilidad hidráulica es una función del valor de la función volumétrica. La Figura 4.3 presenta una curva que muestra una relación típica entre la conductibilidad hidráulica y la presión de poro.



**Figura 4.3: Forma general de la función de conductibilidad hidráulica**

Se han desarrollado técnicas para predecir la función de conductibilidad hidráulica de una función característica suelo-agua. Establecer una función característica generalmente no es tan complicado como realizar una prueba de laboratorio para medir la función de conductibilidad.

#### 4.3.1 Cálculo de la Conductibilidad Hidráulica

Se utiliza el método dado por Green y Corey en 1971, para estimar la función de conductibilidad de la función característica suelo-agua. Se presentan los detalles de este método predictivo y algunas funciones de conductibilidad hidráulicas típicas se presentan en las Láminas 4-01 al 4-05.

Definiendo la conductibilidad hidráulica para regiones donde la presión de poro es negativa, es posible analizar problemas que involucran flujo en suelos saturados y no saturado.

#### 4.4 LEY DE FLUJO

Se formula en base a que el flujo de agua a través de suelos en estados saturado y no saturado sigue la Ley de Darcy:

$$q = ki \quad (4.2)$$

Donde:

- q : Descarga específica
- k : Conductibilidad Hidráulica
- i : Gradiente Hidráulico

La Ley de Darcy se derivó originalmente para suelos saturados, pero las investigaciones posteriores realizadas por Richards en 1931 y Childs & Collins-George en 1950 han demostrado que también pueden aplicarse al flujo de agua a través de suelos en estado no saturado. La única diferencia es que en el flujo en condiciones no saturadas la conductibilidad hidráulica no es constante, varía con el cambio en volumen de agua contenido en el suelo y también varía indirectamente con el cambio en la presión poros.

La Ley de Darcy también se escribe cómo:

$$v = ki \quad (4.3)$$

Donde  $v$  es conocido como la velocidad de Darcy.

La velocidad media real con la que el agua se desplaza a través del suelo está dada por la velocidad de Darcy dividida por la porosidad del suelo. En este caso solo se presenta la velocidad de Darcy.

##### 4.4.1 Ecuaciones que Gobiernan el Flujo

La ecuación de diferencial usada en la formulación del flujo es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.4)$$

Donde:

- H : Carga total
- $k_x$  : Conductibilidad hidráulica en la dirección X
- $k_y$  : Conductibilidad hidráulica en la dirección Y
- Q : Límite de flujo aplicado.
- $\theta$  : cambio de volumen
- t : Tiempo

La ecuación para la cual el flujo que entra y sale es constante en todo momento, el lado derecho de la ecuación desaparece, por consiguiente la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (4.5)$$

Los cambios en contenido de agua son dependientes de los cambios en el estado de esfuerzos y las propiedades del suelo.

El estado de esfuerzos para las condiciones saturadas y no saturada pueden ser descritas a través de dos variables de estado ( $\sigma - ua$ ) y ( $ua - uw$ ) donde  $\sigma$  es el esfuerzo total, el  $ua$  es la presión de poro-aire, y el  $uw$  es la presión de poro-agua (Fredlund y Morgenstern, 1976 y Fredlund y Morgenstern, 1977).

En este trabajo se realizan para condiciones de esfuerzo total constante, es decir, no hay ninguna carga o descarga de la masa de la suelo. La segunda condición asumida es que la presión de poro-aire permanece constante igual a la presión atmosférica durante el proceso de filtración transitoria. Esto significa



que  $(\sigma - ua)$  permanece constante y no tiene efecto en el cambio del valor de la función volumétrica. Los cambios en la función sólo dependen de los cambios de  $(ua - uw)$ , y con  $ua$  que permanece constante, el cambio en el valor de la función volumétrica, sólo es una función de cambios de presión de poro.

Un cambio en la función volumétrica puede relacionarse con el cambio en la presión de poro-agua por la ecuación:

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \quad (4.6)$$

Donde  $m_w$  es la pendiente de la curva del almacenamiento.

La carga hidráulica total se define como:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (4.7)$$

Donde:

- $u_w$  : Presión de poro-agua
- $\gamma_w$  : Peso de la unidad de agua
- $y$  : Elevación

La ecuación 4.7 puede reestructurarse como:

$$u_w = \gamma_w (H - y) \quad (4.8)$$

Sustituyendo la Ecuación 4.8 en la ecuación 4.6 tenemos:

$$\partial\theta = m_w \gamma_w (H - y) \quad (4.9)$$

Ahora puede sustituirse  $\partial\theta$  en la ecuación 4.4 y puede llegar a la expresión siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - y)}{\partial y} \quad (4.10)$$

Puesto que la elevación  $Y$  es constante, la derivada de  $Y$  con respecto al tiempo desaparece por lo tanto queda la ecuación diferencial siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.11)$$

#### 4.4.2 Sistema de Coordenadas

El sistema de la coordenada global usado en la formulación de elementos finitos es el primer cuadrante del sistema de coordenadas cartesianos  $x$ - $y$  convencionales.

El sistema de coordenadas locales usadas en la formulación de matrices de elementos se presenta en la Figura 4.4. También se presenta las coordenadas locales para el nudo. Las coordenadas locales para cada uno de los nudos se dan en la Tabla 4.1.

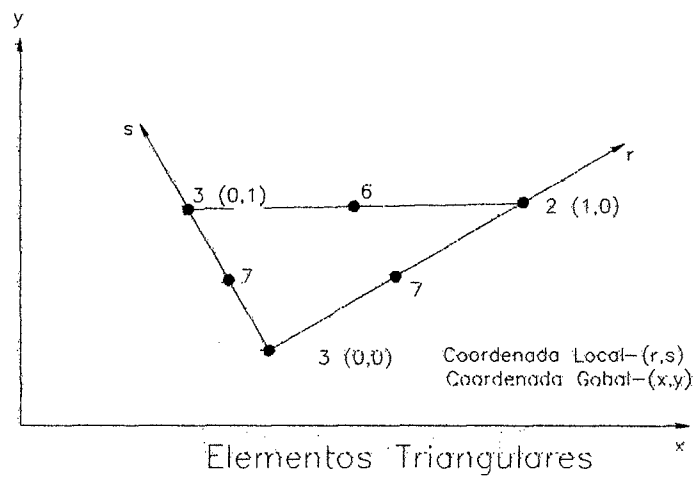
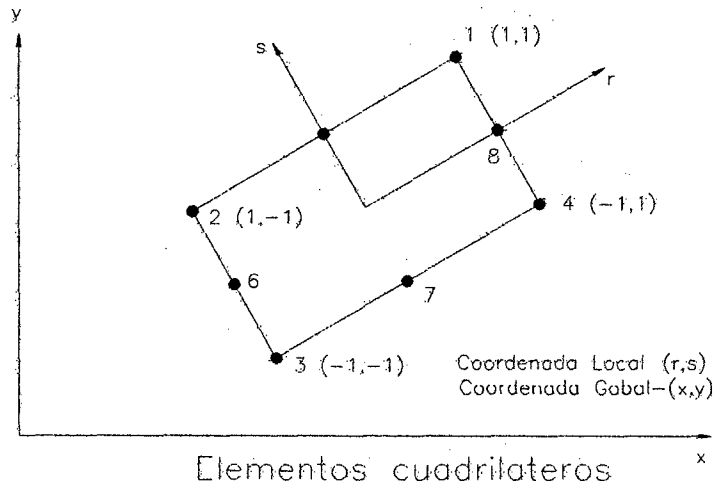
Tabla 4.1: Sistema local de numeración de los nudos de un elemento

TIPO DE ELEMENTO	NUDO	r	s
Cuadrilátero	1	+1	+1
	2	-1	+1
	3	-1	-1
	4	+1	-1
	5	0	+1
	6	-1	0
	7	0	-1
	8	1	0
Triangular	1	0	0
	2	1	0
	3	1	1
	4	--	--
	5	1/2	0
	6	1/2	1/2
	7	0	1/2
	8	--	--

El nudo utilizado para distinguir entre elementos triangulares y cuadriláteros. Si el cuarto número del nudo es cero, el elemento es triangular. Si el cuarto número del nudo es diferente de cero, el elemento es cuadrilátero.

En el caso de elementos cuadriláteros los nudos 5, 6, 7, y 8 son nudos secundarios. Y en elementos triangulares los nudos 5, 6, y 7 son nudos secundarios.

Los sistemas de las coordenadas locales y globales están relacionados por un juego de funciones de la interpolación.



**Figura 4.4: Sistema de coordenadas Local y Global**

La relación entre las coordenadas X-Y y las coordenadas locales en cualquier parte del elemento están dadas por las ecuaciones siguientes:

$$x = \langle N \rangle \{X\} \tag{4.12}$$

$$y = \langle N \rangle \{Y\} \tag{4.13}$$

Donde  $\langle N \rangle$  es un vector de interpolación y  $\{X\}$  e  $\{Y\}$  son las coordenadas x-y globales de los nudos del elemento. Las funciones interpolación se expresan en

términos de coordenadas locales. Por consiguiente, una vez que se haya especificado un juego de coordenadas locales (r,s), las coordenadas globales correspondientes pueden ser determinadas a través de las Ecuaciones 4.12 y 4.13.

#### 4.4.3 Funciones de Interpolación

El juego general de funciones de interpolación utilizados en el análisis de infiltración, fue presentado por Bañe en 1982. Estas funciones generales son convenientes para elementos que tienen algunos, ninguno, o todos los nodos secundarios deferentes.

Las funciones interpolando en términos de coordenadas locales r, s para los elementos cuadriláteros y triangulares se dan en las Tablas 4.2 y 4.3 respectivamente.

**Tabla 4.2: Funciones de interpolación para elementos cuadriláteros**

FUNCIÓN INTERPOLACION	SE INCLUYE SI EL NUDO ESTA PRESENTE			
	5	6	7	8
$N1 = (1+r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}N5$	—	—	$-\frac{1}{2}N8$
$N2 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}N5$	$-\frac{1}{2}N6$	—	—
$N3 = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)$	—	$-\frac{1}{2}N6$	$-\frac{1}{2}N7$	—
$N4 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s)$	—	—	$-\frac{1}{2}N7$	$-\frac{1}{2}N8$
$N5 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1+s)$	—	—	—	—
$N6 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1-r)$	—	—	—	—
$N7 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s)$	—	—	—	—
$N8 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1+r)$	—	—	—	—

**Tabla 4.3: Funciones de interpolación para elementos triangulares**

FUNCION INTERPOLACION	SE INCLUYE SI EL NUDO ESTA PRESENTE		
	5	6	7
$N1 = 1-r-s$	$-\frac{1}{2}N5$	—	$-\frac{1}{2}N7$
$N2 = r$	$-\frac{1}{2}N5$	$-\frac{1}{2}N6$	—
$N3 = s$	—	$-\frac{1}{2}N6$	$-\frac{1}{2}N7$
$N5 = 4r(1-s)$	—	—	—
$N6 = 4rs$	—	—	—
$N7 = 4s(1-r-s)$	—	—	—

Las funciones son representadas por una ecuación lineal cuando los nudos secundarios no son incluidos y una ecuación cuadrática (no lineal) cuando los nudos secundarios son incluidos.

#### 4.4.4 Modelo de las Variables de Campo

Para formular un análisis de elementos finitos es necesario adoptar un modelo para la distribución de las variables campo dentro del elemento. La variable de campo en el análisis de infiltración es la carga total(H), por lo cual es necesario adoptar un modelo para la distribución de H dentro del elemento.

Para un análisis de infiltración se asume que la distribución de carga de presión dentro del elemento sigue las funciones de interpolación adoptadas. Esto significa que la distribución de carga es lineal cuando no existen nudos secundarios, y la distribución de carga es no lineal cuando existen nudos secundarios.

La forma de la ecuación de la distribución de carga (H) es:

$$h = \langle N \rangle \{H\} \quad (4.14)$$

Donde:

$h$  = la carga a cualquier coordenada local

$\langle N \rangle$  = el vector de función de la interpolación

$\{H\}$  = el vector de carga de los nudos

#### 4.4.5 Derivada de la Función de Interpolación

La relación constitutiva para un análisis de la filtración es la Ley de Darcy. La ecuación es:

$$q = k i \quad (4.15)$$

La gradiente  $i$  es uno de los parámetros importantes requerido en la formulación de un análisis de filtración por el método de elementos finitos. A continuación se presenta el procedimiento usado para calcular la gradiente.

Del modelo de distribución de carga adoptado, la carga en cualquier punto dentro del elemento en términos de las cargas nodales:

$$h = \langle N \rangle \{H\} \quad (4.16)$$

La gradiente en las direcciones  $x$  e  $y$  son:

$$i_x = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} (H) \quad (4.17)$$

$$i_y = \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} (H) \quad (4.18)$$

Las funciones interpolación se escriben en términos de  $r$  y  $s$  y no en términos de  $x$  e  $y$ . Por consiguiente las derivadas deben ser determinadas por la regla de la cadena de diferenciación, como sigue:

$$\frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad (4.20)$$

Esto puede escribirse como:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (4.21)$$

Donde [J] es la matriz Jacobiana y se define como:

$$[J] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.22)$$

La derivada de la función de la interpolación con respecto a x e y se llama la matriz B y puede ser determinada invirtiendo la matriz Jacobiana y volviendo a escribir la ecuación como:

$$[B] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.23)$$

Desmembrando las ecuaciones 4.12 y 4.13 tenemos:

$$x = \langle N \rangle \{X\}$$

$$y = \langle N \rangle \{Y\}$$

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \{X\}$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \{X\}$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial r} \{Y\}$$

$$\frac{\partial y}{\partial s} = \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial s} \{Y\}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 4.22, la matriz Jacobiana resultante es la siguiente:



$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N_1, N_2, \dots, N_n \rangle}{\partial r} & \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ \dots & \dots \\ X_n & Y_n \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \langle N_1, N_2, \dots, N_n \rangle}{\partial s} & \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Es necesario obtener las derivadas de las funciones de la interpolación con respecto a  $r$  y  $s$  para calcular la matriz Jacobiana (Ecuación 4.24) y para calcular los gradientes de flujo (Ecuaciones 4.17, 4.18, y 4.23).

Las derivadas de las funciones de la interpolación con respecto a  $r$  y  $s$  usadas para un análisis de infiltración por el método de elementos finitos, para elementos cuadriláteros y triangulares se dan en las Tablas 4.4 y 4.5 respectivamente.

**Tabla 4.4: Derivados de función de interpolación para los elementos cuadriláteros**

FUNCION DERIVADA	SE INCLUYE SI EL NUDO ESTA PRESENTE			
	5	6	7	8
$N1,r = \frac{1}{4}(1+s)$	$-\frac{1}{2}(N5,r)$	—	—	$-\frac{1}{2}(N8,r)$
$N2,r = -\frac{1}{4}(1+s)$	$-\frac{1}{2}(N5,r)$	$-\frac{1}{2}(N6,r)$	—	—
$N3,r = -\frac{1}{4}(1-s)$	—	$-\frac{1}{2}(N6,r)$	$-\frac{1}{2}(N7,r)$	—
$N4,r = \frac{1}{4}(1-s)$	—	—	$-\frac{1}{2}(N7,r)$	$-\frac{1}{2}(N8,r)$
$N5,r = \frac{1}{2}(2r+2sr)$	—	—	—	—
$N6,r = -\frac{1}{2}(1-s^2)$	—	—	—	—
$N7,r = -\frac{1}{2}(2r-2sr)$	—	—	—	—
$N8,r = \frac{1}{2}(1-s^2)$	—	—	—	—
$N1,s = \frac{1}{4}(1+r)$	$-\frac{1}{2}(N5,s)$	—	—	$-\frac{1}{2}(N8,s)$
$N2,s = \frac{1}{4}(1-r)$	$-\frac{1}{2}(N5,s)$	$-\frac{1}{2}(N6,s)$	—	—
$N3,s = -\frac{1}{4}(1-r)$	—	$-\frac{1}{2}(N6,s)$	$-\frac{1}{2}(N7,s)$	—
$N4,s = -\frac{1}{4}(1+r)$	—	—	$-\frac{1}{2}(N7,s)$	$-\frac{1}{2}(N8,s)$
$N5,s = \frac{1}{2}(1-r^2)$	—	—	—	—
$N6,s = -\frac{1}{2}(2s-2sr)$	—	—	—	—
$N7,s = -\frac{1}{2}(1-r^2)$	—	—	—	—
$N8,s = \frac{1}{2}(2s+2sr)$	—	—	—	—

**Tabla 4.5: Derivada de la función de interpolación para elementos triangulares**

FUNCION DERIVADA	SE INCLUYE SI EL NUDO ESTA PRESENTE		
	5	6	7
$N1,r = -1.0$	$-\frac{1}{2}(N5,r)$	—	—
$N2,r = 1.0$	$-\frac{1}{2}(N5,r)$	$-\frac{1}{2}(N6,r)$	—
$N3,r = 0.0$	—	$-\frac{1}{2}(N6,r)$	$-\frac{1}{2}(N7,r)$
$N5,r = (4-8r-4s)$	—	—	—
$N6,r = 4s$	—	—	—
$N7,r = -4s$	—	—	—
$N1,s = -1.0$	$-\frac{1}{2}(N5,s)$	—	—
$N2,s = 0.0$	$-\frac{1}{2}(N5,s)$	$-\frac{1}{2}(N6,s)$	—
$N3,s = 1.0$	—	$-\frac{1}{2}(N6,s)$	$-\frac{1}{2}(N7,s)$
$N5,s = -4r$	—	—	—
$N6,s = 4r$	—	—	—
$N7,s = (4-4r-8s)$	—	—	—

La notación utilizada en las tablas anteriores es la siguiente:

$$N_{i,r} = \frac{\partial N_i}{\partial r} \quad N_{i,s} = \frac{\partial N_i}{\partial s}$$

La matriz de Jacobiana es una matriz 2x2:

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

La inversa de [J] esta dada por la ecuación:

$$[J]^{-1} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

El determinante de [J] es:

$$\det[J] = (J_{11} * J_{22} - J_{21} * J_{12}) \quad (4.27)$$

#### 4.5 ECUACIONES DE ELEMENTOS FINITOS

La ecuación de elementos finitos que se obtiene de aplicar el método de residuos de Galerkin a la ecuación diferencial 4.11 es:

$$\int_V ([B]^T [C] [B]) dv \{H\} + \int_V (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dv \{H\}, t = q \int_A \langle N \rangle^T dA \quad (4.28)$$

donde:

[B] = la matriz de gradiente

[C] = matriz de conductibilidad hidráulica

{H} = vector de cargas nodales

$\langle N \rangle^T \langle N \rangle = [M]$  = matriz de masa

$\{H\}, t = \frac{\partial h}{\partial t}$  = cambio en carga de agua con el tiempo

q = unidad de flujo por unidad de lado del elemento.

$\langle N \rangle$  = vector función de interpolación

Para un análisis de infiltración bidimensional se considera que el ancho del elemento es constante. La ecuación de elementos finitos puede escribirse por consiguiente como:

$$t \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + t \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{H\}, t = qt \int_A \langle N \rangle^T dA \quad (4.29)$$

Donde t es el espesor del elemento.

Cuando  $t$  es una constante, la integral de volumen  $\int_v$  se vuelve la integral sobre el área  $\int_A$  y la integral sobre área se vuelve la integral sobre la longitud  $\int_L$  del nudo de la esquina al nudo de la otra esquina.

En un análisis del eje simétrico el espesor del elemento equivalente es la distancia radial sobre el eje simétrico. La distancia radial completa es  $2\pi$  radianes  $R$ . El espesor equivalente es  $R$ . La ecuación de elementos finitos para el caso del análisis con eje simétrico es la siguiente:

$$t \int_A \left( [B]^T [C] [B] R \right) dA \{H\} + t \int_A \left( \lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R \right) dA \{H\}, t = qt \int_L \left( \langle N \rangle^T R \right) dL \quad (4.30)$$

La distancia radial  $R$  no es una constante como es el espesor  $t$  para un análisis bidimensional dentro de un elemento; por consiguiente  $R$  es una variable en la integración.

En forma abreviada, la ecuación del elemento finito es:

$$[K] \{H\} + [M] \{H\}, t = \{Q\} \quad (4.31)$$

Donde:

$[K]$  = elemento de la matriz característica

$$[k] = t \int_A \left( [B]^T [C] [B] R \right) dA \{H\} \quad \text{ó}$$

$$[k] = \int_A \left( [B]^T [C] [B] R \right) dA \{H\}$$

$[M]$  = la matriz de masa

$$[M] = t \int_A \left( \lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R \right) dA \quad \text{ó}$$

$$[M] = \int_A \left( \lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R \right) dA$$

$\{Q\}$  = vector de flujo aplicado

$$\{Q\} = qt \int_L \langle N \rangle^T dL \quad \text{ó}$$

$$\{Q\} = q \int_L \langle N \rangle^T R dL$$

La Ecuación 4.31 es la ecuación general de elementos finitos para un análisis de la infiltración transitoria. Para un análisis de flujo establecido (steady-state), la carga no es una función de tiempo y por consiguiente el término  $[M] \{H\}, t$  desaparece y la ecuación de elementos finitos se reduce a:

$$[K] \{H\} = \{Q\} \quad (4.32)$$

#### 4.5.1 Integración en Función del Tiempo

La solución de las ecuaciones de elementos finitos para un análisis infiltración transitoria es una función del tiempo como indica el término  $\{H\}, t$  en la ecuación de elementos finitos. La integración con respecto al tiempo puede ser realizada por un esquema de aproximación de diferencias finitas.

La ecuación de elementos finitos en términos de diferencias finitas fue planteada por Segerlind en 1984.

$$(\omega \Delta t [K] + [M]) \{H_1\} = \Delta t ((1 - \omega) \{Q_0\} + \omega \{Q_1\}) + ([M] - (1 - \omega) \Delta t [K]) \{H_0\} \quad (4.33)$$

Donde:

$t$  = Incremento de tiempo

$\omega$  = Constante entre 0 y 1

$\{H_1\}$  = Carga al inicio de incremento de tiempo

$\{H_0\}$  = Carga a la salida de incremento de tiempo

$\{Q_1\}$  = Flujo nodal al inicio de incremento de tiempo

$\{Q_0\}$  = Flujo nodal a la salida de incremento de tiempo

$[K]$  = Matriz de elementos característica

$[M]$  = Matriz de masa de elemento

El Método de diferencia hacia atrás, un método que considera  $\theta$  igual a 1.0.

La ecuación finita para un análisis transitorio para  $\theta$  igual a 1.0 es:

$$(\Delta t[K] + [M])\{H_1\} = \Delta t\{Q_1\} + [M]\{H_0\} \quad (4.34)$$

En términos generales, las condiciones iniciales para realizar un análisis infiltración transitorio deben conocerse de antemano.

#### 4.5.2 Integración Numérica

El método de integración numérica de Gauss formada por la matriz característica de elementos  $[K]$  y la matriz de masa  $[M]$ ; las integrales se aplican a los puntos específicamente definidos en los elementos y entonces se suman para todos los puntos.

La integral de la Ecuación 4.31 es la siguiente:

$$\int_A ([B])^T [C] [B] dA \quad (4.34)$$

Puede reemplazarse por:

$$\sum_{j=1}^n [B_j]^T [C_j] [B_j] \det|J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (4.35)$$

Donde:

$j$  = el punto de la integración

$n$  = el número de puntos de la integración

$\det|J_j|$  = determinante de la matriz Jacobiana

$W_{1j}, W_{2j}$  = los factores de ponderación

El número de puntos requeridos para la integración depende del número de nudos y de la forma de los elementos.

Las Tablas 4.6 al 4.9 contienen el número de puntos que son usados para realizar la integración numérica en un análisis de infiltración.

**Tabla 4.6: Valores de r, s, w1 y w2 para elementos cuadriláteros con cuatro puntos de integración**

PUNTO	r	s	w1	w2
1	+0.57735	+0.57735	1.0	1.0
2	-0.57735	+0.57735	1.0	1.0
3	-0.57735	-0.57735	1.0	1.0
4	+0.57735	-0.57735	1.0	1.0

**Tabla 4.7: Valores de r, s, w1 y w2 para elementos cuadriláteros con nueve puntos de integración**

PUNTO	r	s	w1	w2
1	+0.77459	+0.77459	5/9	5/9
2	-0.77459	+0.77459	5/9	5/9
3	-0.77459	-0.77459	5/9	5/9
4	+0.77459	-0.77459	5/9	5/9
5	0.00000	+0.77459	8/9	5/9
6	-0.77459	0.00000	5/9	8/9
7	0.00000	-0.77459	8/9	5/9
8	+0.77459	0.00000	5/9	8/9
9	-0.00000	-0.00000	8/9	8/9

**Tabla 4.8: Valores de r, s, w1 y w2 para Elementos Triangulares con un punto de integración**

PUNTO	R	s	w1	w2
1	0.33333	0.33333	1.0	0.5

**Tabla 4.9: Valores de r, s, w1 y w2 para elementos cuadriláteros con tres puntos de integración**

PUNTO	r	s	w1	w2
1	0.16666	0.16666	1/3	1/2
2	0.66666	0.16666	1/3	1/2
3	0.16666	0.66666	1/3	1/2

La integración para un punto de un elemento triangular produce una pendiente constante a lo largo del elemento. El número de puntos de integración se denota como el orden de la integración.

El orden de integración apropiado está en función de la presencia de nudos secundarios. Cuando un elemento presenta nudos secundarios, las funciones de interpolación son no lineales y por consiguiente se requiere un orden de integración más alto. En la Tabla 4.10 se presentan órdenes de integración aceptables de acuerdo al tipo de nudo.

**Tabla 4.10: Orden de Integración**

Tipo del elemento	Nodos Secundario	Orden de Integración
Cuadrilátero	NO	4
Cuadrilátero	SI	9
Triangular	NO	1
Triangular	SI	3

También es aceptable usar integración de cuarto orden para elementos cuadriláteros que tienen nudos secundarios. A esto se llama un orden de integración reducido (Bañe, 1982). Con este método pueden obtenerse resultados aceptables. Por ejemplo, la integración reducida es útil en zonas saturadas donde la pendiente hidráulica es baja y la conductibilidad hidráulica es



constante. El uso selectivo de integración reducida puede reducir grandemente el número de cálculos requeridos.

También es posible usar integración de orden tres y orden nueve con elementos que no tienen ningún nudo secundario. Sin embargo, los beneficios de esto no son muy significativos, particularmente para elementos cuadriláteros. La integración de orden nueve para elementos cuadriláteros involucra la aplicación de la informática más que la integración de orden cuatro, y lo ganado por él computo adicional no es muy significativo. Como una regla general, los elementos cuadriláteros deben tener nudos secundarios para lograr beneficios significativos de la integración de orden nueve.

La situación es ligeramente diferente para elementos triangulares. La integración del orden uno significa que las propiedades de los materiales y las pendientes de flujo son constantes dentro del elemento. Esto puede llevar a una actuación pobre del elemento, particularmente si el elemento está en una zona no saturada donde la conductibilidad hidráulica varía grandemente con los cambios en presión de poro. Usando la integración de orden tres, incluso sin usar nudos secundarios, pueden mejorar los resultados, las propiedades de los materiales y pendientes dentro de los elementos son distribuidos de una manera más realista. El uso de integración del orden tres en elementos triangulares sin nudos secundarios es considerado aceptable para elementos triangulares en una malla que tiene predominantemente elementos cuadriláteros. Esta aproximación no es recomendable si la malla de elementos finitos está formada principalmente por elementos triangulares sin nudos secundarios.

En general, es suficiente usar integración de orden tres para los elementos triangulares y integración del orden cuatro para los elementos cuadriláteros. En situaciones donde hay zonas no saturadas dentro de un elemento donde la conductibilidad hidráulica varía grandemente, es mejor usar elementos cuadriláteros con nudos secundarios junto con una integración de orden nueve.

### 4.5.3 Matriz de Conductibilidad Hidráulica

La forma general de la matriz de conductibilidad hidráulica es:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Donde:

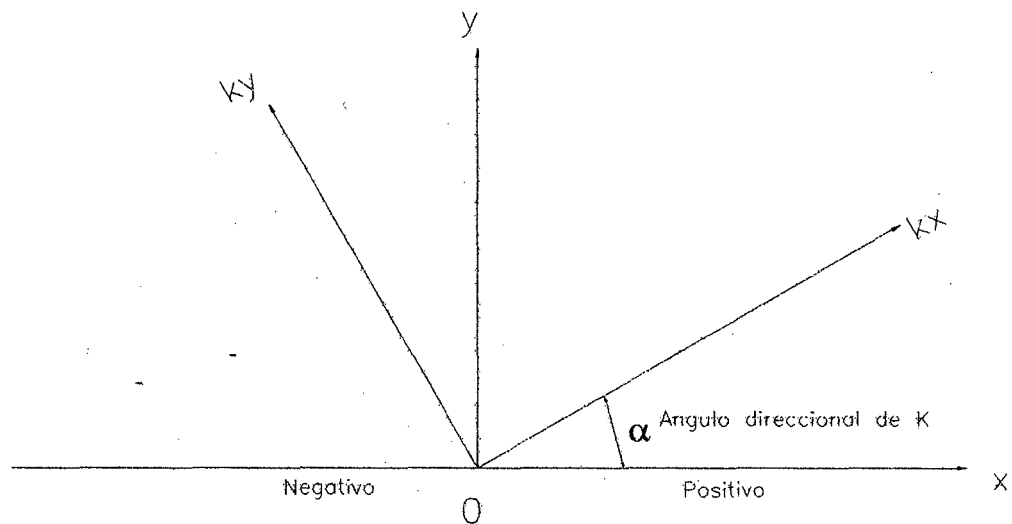
$$C_{11} = k_x \cos^2 \alpha + k_y \sin^2 \alpha$$

$$C_{22} = k_x \sin^2 \alpha + k_y \cos^2 \alpha$$

$$C_{12} = k_x \cos \alpha \sin \alpha - k_y \sin \alpha \cos \alpha$$

$$C_{21} = C_{12}$$

Los parámetros  $k_x$  y  $k_y$  se definen en la Figura 4.5



**Figura 4.5: Definición de los parámetros de la matriz de conductibilidad**

Cuando  $\alpha$  es cero,  $[C]$  reduce a

$$[C] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

El parámetro  $k_x$  siempre es determinado de la función de conductibilidad hidráulica. El parámetro  $k_y$  se calcula de  $k_x$  multiplicado por K-proporción, como en la ecuación 4.38

$$K_y = K_x \cdot K_{prop} \quad (4.38)$$

#### 4.5.4 Matriz de Masa

Como se presentó primero en la Ecuación 4.31, la masa del elemento (almacenamiento) la matriz para un análisis bidimensional se define como:

$$[M] = t \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA$$

Y para el caso de un análisis del eje simétrico:

$$[M] = \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R) dA$$

Donde:

$m_w$  = Pendiente de curva de almacenamiento

$\gamma_w$  = Peso del unitario del agua

$t$  = Espesor del elemento

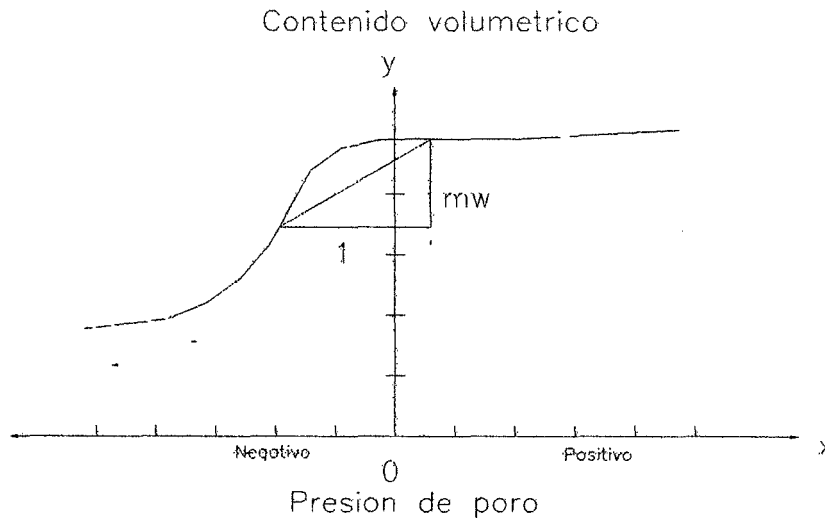
$R$  = Distancia radial del eje simétrico al punto de integración

$\langle N \rangle$  = Función vector de interpolación.

Se calcula  $m_w$  como la pendiente de una línea recta entre dos puntos de presiones de poro diferentes, como se ilustra en la Figura 4.6.

La pendiente de esta línea recta puede verse como la proporción de cambio promedio durante un incremento de tiempo. Se considera que este valor se aproxima más al valor real que si tomáramos la derivada de la función a un punto específico.

Una excepción a este procedimiento es cuando las presiones de poro de dos puntos consecutivos son casi idénticas. En este caso, se calcula  $mw$  como el promedio de las derivadas de la función en dos puntos.



**Figura 4.6: Calculo de mw**

#### 4.5.5 Límite de Flujo

El flujo( $Q$ ) en un nudo de frontera para un análisis bidimensional se define como:

$$[Q] = qt \int_L \langle N \rangle^T dL \quad (4.39)$$

Para un análisis del eje simétrico se define cómo:

$$[Q] = q \int_L \langle N \rangle^T R dL \quad (4.40)$$

Para un análisis de vista de plan se define cómo:

$$[Q] = q \int_A \langle N \rangle^T \langle N \rangle dA \quad (4.41)$$

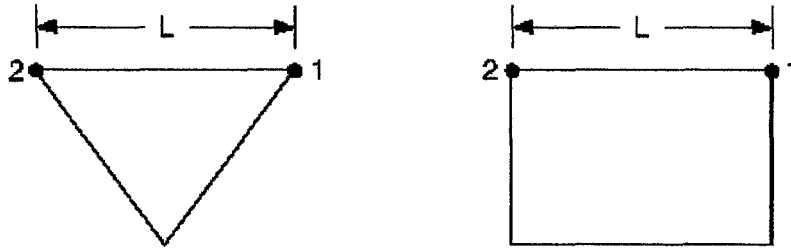
Donde:

- $\{Q\}$  : Vector de flujo nodal
- $q$  : Flujo unitario para un lado de un elemento
- $t$  : Espesor del elemento
- $A$  : Area del elemento
- $R$  : Distancia radial del eje simétrico a los nudos de esquina del elemento
- $\langle N \rangle$  : Vector función de interpolación

Las soluciones a las integrales dependen del tipo de análisis y de la presencia de nudos secundarios. Para los análisis bidimensional (sección vertical) y eje simétrico, las soluciones a las integrales se ilustran en las Figuras 4.9 y 4.10 respectivamente.

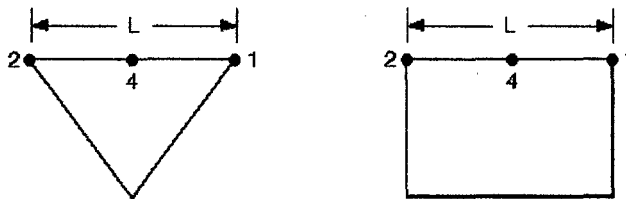
Pueden especificarse dos tipos de límites de flujo: un límite de flujo nodal ( $Q$ ) y un límite de flujo unitario ( $q$ ). Un límite de flujo nodal ( $Q$ ) puede especificarse directamente en los nudos de frontera. El límite de flujo unitario ( $q$ ) debe especificarse a lo largo de los bordes de los elementos. El valor de  $Q$  es necesario para realizar la integración numérica

Para un análisis bidimensional (sección vertical) y eje simétrico, el flujo nodal  $Q$  calculado es dependiente del espesor del elemento especificado.



$$a_1 = a_2 = \frac{L}{2}$$

a) Sin nudo secundario

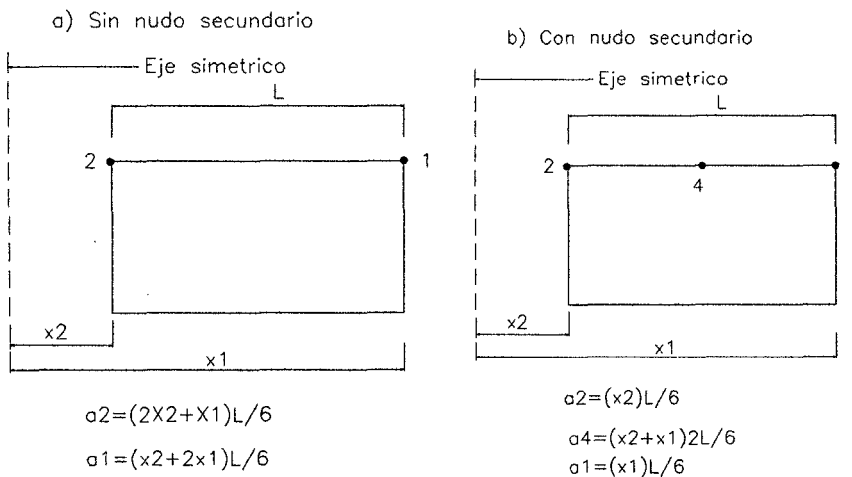


$$a_1 = a_2 = \frac{L}{6}$$

$$a_4 = \frac{4L}{6}$$

b) Con nudo secundario

**Figure 4.7** Área de contribución para elementos bidimensionales verticales con ancho unitario



$$a_2 = (2x_2 + x_1)L/6$$

$$a_1 = (x_2 + 2x_1)L/6$$

$$a_2 = (x_2)L/6$$

$$a_4 = (x_2 + x_1)2L/6$$

$$a_1 = (x_1)L/6$$

**Figura 4.8:** Área de contribución para elementos simétricos



Las soluciones de la ecuación pueden acomodar elementos aislados en la serie. Este rasgo hace posible que se pueda agregar y anular elementos a la malla de elementos finitos sin generar un desorden y tampoco tener que re enumerar los nudos y elementos.

El objetivo de resolver las ecuaciones de elementos finitos es de calcular la carga de presión para cada nudo. Sin embargo, la conductibilidad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento del material son una función de la carga, las ecuaciones del elemento finitos son no lineales. Las propiedades correctas de los materiales no son conocidas al inicio del análisis; por consiguiente, se exige un esquema iterativo para resolver las ecuaciones.

Se utiliza la técnica de la sustitución repetida en el proceso iterativo. Para la primera iteración, son las condiciones iniciales dadas por el usuario. Para el análisis de flujo establecido (steady-state), las cargas calculadas en el paso anterior son usadas para definir las propiedades de los materiales para cada iteración. Para un análisis del transitorio, la carga en el punto medio del intervalo de tiempo se usa para definir las propiedades de los materiales; es decir, las propiedades materiales se definen como un promedio del cálculo anterior y el presente. El proceso reiterativo continúa hasta que los resultados satisfagan el criterio de convergencia.

Se usa el módulo Euclidiano del vector carga de presión como una medida de convergencia. El módulo del vector carga de agua es definido como:

$$\|h\| = \left( \sum_{j=1}^n |h_j|^2 \right)^{2/3} + 1.0 \quad (4.42)$$

Donde:

$n$  = Número de nodos

$h_j$  = Carga total- Elevación del nudo  $j$



La norma del vector es una medida del tamaño de la vector carga de presión. Una constante igual 1.0 se agrega a la norma del vector para impedir que tome un valor cero.

Se asume que la solución ha convergido cuando la diferencia entre los módulos de los vectores de carga de presión es menor que un valor especificado por el usuario.

#### 4.7.1 Gradientes y Velocidades

Una vez que la solución ha convergido y las cargas nodales son conocidas, se calcula las gradientes hidráulicas y velocidades de flujo de Darcy para cada uno de los puntos de integración dentro de cada elemento. La gradiente para cada punto de integración de Gauss se calcula de la ecuación:

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B]\{H\} \quad (4.43)$$

Donde:

$i_x$  = Pendiente en dirección x

$i_y$  = Pendiente en dirección y

[B] = Matriz de pendientes

{H} = Vector carga total de los nudos

Se calculan las velocidades de Darcy para cada punto de integración de Gauss de la ecuación:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{H\} \quad (4.44)$$

Donde:

$v_x$  = Velocidad en dirección x

$v_y$  = Velocidad en dirección y

[C] = matriz de conductibilidad hidráulica

Se guarda en una serie los valores de conductibilidad hidráulica para cada punto de Gauss usado en la formulación de las ecuaciones de elementos finitos. Los mismos valores de conductibilidad hidráulica son usados para calcular las velocidades.

La velocidad es definida como la descarga específica  $Q$  que es el flujo total dividida por el área de la sección. No es la velocidad real con la que el agua se mueve entre las partículas de suelo. La velocidad microscópica real es:

$$v = \frac{q}{n} \quad (4.45)$$

Donde:

$v$  = Promedio de la velocidad lineal

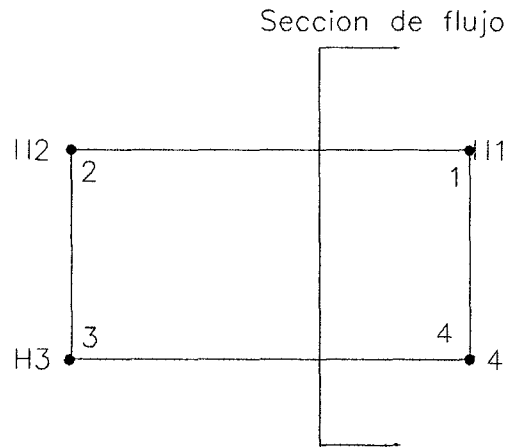
$q$  = Descarga específica

$n$  = Porosidad

#### 4.7.2 Cantidad de Flujo

La cantidad de la filtración que fluye por una sección definida, puede ser calculada de la carga en los nudos y los coeficientes de la ecuación de elementos finitos.

Por ejemplo, considere una malla de un sólo elemento, cómo se ilustra en la Figura 4.10. El objetivo es computar el flujo total en una sección vertical del elemento.



**Figura 4.10: Ilustración de una sección de flujo**

La ecuación 4.34 puede volverse a escribir como:

$$[K]\{H\} + [M]\frac{\Delta H}{\Delta t} = \{Q\} \quad (4.46)$$

En un análisis del flujo establecido (steady-state), el término  $[M]\frac{\Delta H}{\Delta t}$  del almacenamiento se vuelve cero, y la ecuación puede reducirse a:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (4.47)$$

La ecuación general de elementos finitos para un elemento es como sigue:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q1 \\ Q2 \\ Q3 \\ Q4 \end{Bmatrix} \quad (4.48)$$

De la Ley de Darcy (Ecuación 4.2), el flujo total entre dos puntos es:

$$Q = kA \frac{\Delta H}{l} \quad (4.49)$$

Los coeficientes  $c$  en la Ecuación 4.48 es una representación de  $\frac{kA}{l}$  en dicha ecuación. Por consiguiente, el flujo del Nudo  $i$  al Nudo  $j$  es:

$$Q_{ij} = C_{ij}(H_i - H_j) \quad (4.50)$$

En un análisis transitorio, el aporte debido al almacenamiento del material, en el cálculo de la cantidad de flujo total debe incluirse el efecto del almacenamiento. El cambio en la cantidad de flujo debido al efecto del almacenamiento puede expresarse como:

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \\ \Delta H_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{Bmatrix} \quad (4.51)$$

Donde  $H_1, H_2, H_3,$  y  $H_4$  son los cambios de carga total en varios nodos entre el inicio y el final de un intervalo de tiempo. En general, el cambio de carga total del Nudo  $i$  al Nudo  $j$  puede expresarse como:

$$\Delta H_{ij} = \frac{\Delta H_i + \Delta H_j}{2} \quad (4.52)$$

Por consiguiente, el cambio en cantidad de flujo de Nudo  $i$  al Nudo  $j$  debido a un cambio en el valor del almacenamiento es:

$$Q_{ij} = m_{ij} \frac{\Delta H_{ij}}{\Delta t} \quad (4.53)$$

La cantidad de flujo total del Nudo  $i$  al Nudo  $j$  para un análisis de filtración transitoria se convierte en:

$$Q_{ij} = C_{ij}(H_i - H_j) + m_{ij} \frac{\Delta H_{ij}}{\Delta t} \quad (4.54)$$

La cantidad de flujo total a través de la sección de flujo mostrada en la Figura 4.10 es:

$$Q = Q_{21} + Q_{24} + Q_{31} + Q_{34} \quad (4.55)$$

Las líneas de flujo imaginarias de un lado de la sección al otro lado son conocidas como subdivisiones. Se identifica todas las subdivisiones para una sección de flujo definida por el usuario, calcula el flujo para cada subdivisión, luego se suma los valores parciales para obtener la cantidad de flujo total.

#### 4.8 ELEMENTOS INFINITOS

Muchos problemas de infiltración pueden ser clasificados como ilimitados. Considere el caso ilustrado en Figure 4.11, donde la condición a lo largo del límite vertical derecho no puede definirse correctamente como un límite de carga o como un límite de flujo. Se dice que el problema es ilimitado por la derecha. Las condiciones de borde son conocidas sólo a una gran distancia(infinito). Este tipo de problemas ilimitados pueden analizarse aplicando el criterio de elementos infinitos.

La formulación de elementos infinitos presentadas por Bettess en 1992, la cual sólo se formula para elementos cuadriláteros de ocho nudos.

##### 4.8.1 Funciones Utilizadas

Para los elementos normales o elementos isoparametricos se acostumbra a usar las mismas funciones de interpolación presentadas anteriormente donde se relacionan los sistemas de coordenadas locales y globales. Para los elementos infinitos, la relación entre el sistema de la coordenada local y global debe ser descrita por un juego especial de funciones de forma. Las funciones de interpolación son las mismas para todos los elementos, pero las formas geométricas de las funciones son diferentes.

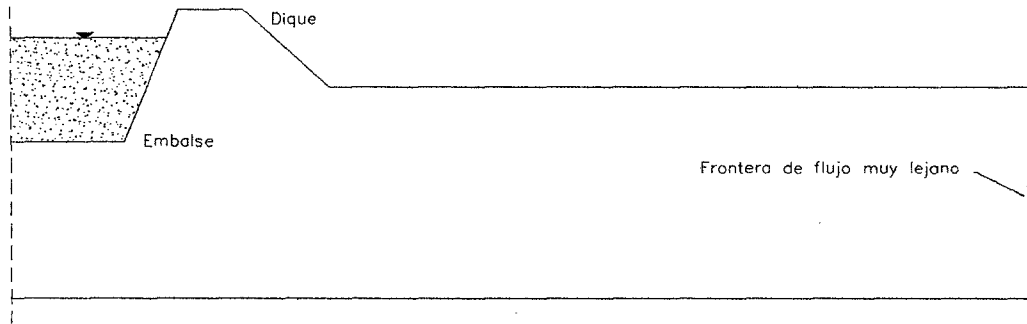


Figura 4.11: Flujo en una sección ilimitada

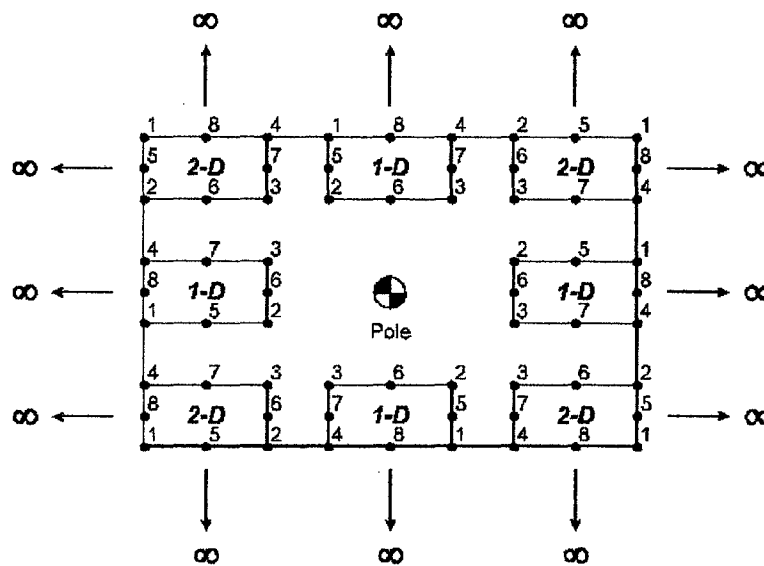


Figura 4.12: Esquema de numeración de nodos para elementos infinitos

La Figura 4.12 presenta los diferentes tipos de elementos que tienen extensión infinita. Las funciones de forma para una dirección y dos direcciones, son mostradas en la Tabla 4.11. En dicha tabla  $r$  y  $s$  son coordenadas locales dentro del elemento,  $M1$  hasta  $M8$  son las funciones para los elementos infinitos mostrados en Figura 4.16.

Se derivan las funciones con respecto a  $r$  y  $s$  para calcular la matriz Jacobiana y los gradientes de flujo para los elementos infinitos. A continuación se presentan las derivadas de las funciones para elementos infinitos en una y dos direcciones en las Tablas 4.12 y 4.13, respectivamente.

**Tabla 4.11: Cuadro de funciones para elementos infinitos**

Elemento Infinito1-D	Elemento Infinito 2-D
$M1 = 0$	$M1 = 0$
$M2 = \frac{(-1-r-rs+s^2)}{1-r}$	$M2 = 0$
$M3 = \frac{(-1-r+rs+s^2)}{1-r}$	$M3 = \frac{-4(1+r+s)}{(1-r)(1-s)}$
$M4 = 0$	$M4 = 0$
$M5 = \frac{(1+r)(1+s)}{2(1-r)}$	$M5 = 0$
$M6 = \frac{2(1-s^2)}{1-r}$	$M2 = \frac{2(1+s)}{(1-r)(1-s)}$
$M7 = \frac{(1-s)(1+r)}{2(1-r)}$	$M2 = \frac{2(1+r)}{(1-r)(1-s)}$
$M8 = 0$	$M8 = 0$

**Tabla 4.12: Derivada de las funciones de interpolación unidimensional para elementos infinitos.**

Derivada en la dirección r	Derivada en la dirección s
$M1,r = 0$	$M1,s = 0$
$M2,r = \frac{(-2-s+s^2)}{(1-r)^2}$	$M2,s = \frac{(-r+2s)}{(1-r)}$
$M3,r = \frac{(-2+s+s^2)}{(1-r)^2}$	$M3,s = \frac{(r+2s)}{(1+r)}$
$M4,r = 0$	$M4,s = 0$
$M5,r = \frac{(1+s)}{(1-r)^2}$	$M5,r = \frac{(1+s)}{2(1+r)}$
$M6,r = \frac{2(1-s^2)}{(1-r)^2}$	$M6,r = \frac{-4s}{(1-r)}$
$M7,r = \frac{(1-s)}{(1-r)^2}$	$M2,r = \frac{(-1+r)}{2(1-r)}$
$M8,r = 0$	$M8,s = 0$

Tabla 4.13: Derivada en dos direcciones

Dirección r	Dirección s
$M1,r = 0$	$M1,s = 0$
$M2,r = 0$	$M2,s = 0$
$M3,r = \frac{-4(s+2)}{(1-r)^2(1-s)}$	$M3,r = \frac{(r+2)}{(1-r)(1-s)^2}$
$M4,r = 0$	$M4,s = 0$
$M5,r = 0$	$M5,s = 0$
$M6,r = \frac{2(1+s)}{(1-r)^2(1-s)}$	$M6,r = \frac{4}{(1-r)^2(1-s)^2}$
$M7,r = \frac{4}{(1-r)^2(1-s)}$	$M2,r = \frac{2(1+r)}{(1-r)(1-s)^2}$
$M8,r = 0$	$M8,s = 0$

Una vez que se haya definido las derivadas de las funciones, el esquema de la integración numérica usado para formar la matriz característica para los elementos infinitos es igual que para los elementos normales. Estas funciones especiales también deben usarse al formular la matriz de masa y el flujo.

#### 4.8.2 Definición del Polo

Para proyectar el borde exterior del elemento infinito al infinito, es necesario definir una posición para el polo. Este simplemente es un punto en alguna posición en el lado opuesto del borde del elemento infinito. La Figura 4.12 muestra la posición del polo del elemento infinito en el centro de la malla de elementos finitos.

Para un elemento infinito uni-direccional, se toman los nodos en el borde infinito que estará hipotéticamente en el infinito. Los nodos secundarios 5 y 7 deben extenderse hacia el infinito. En este caso se usan las ecuaciones 4.55, 4.56, y 4.57.



- Para el infinito sólo en la dirección x:

$$x_5 = x_2 + (x_2 x_p) \quad (4.56)$$

$$x_7 = x_3 + (x_3 x_p)$$

- Para el infinito sólo en la dirección y:

$$y_5 = y_2 + (y_2 y_p) \quad (4.57)$$

$$y_7 = y_3 + (y_3 y_p)$$

- Si el infinito en las direcciones x e y son ambos positivos o negativos, no hay ninguna corrección a  $x_6$  e  $y_7$ . Sin embargo.

$$x_7 = x_3 + (x_3 x_p) \quad (4.58)$$

$$y_6 = y_3 + (y_3 y_p)$$

- Si el infinito en una dirección es positivo y en la otra es negativo, no hay ningún ajuste a  $x_7$  e  $y_6$ . Sin embargo.

$$x_6 = x_3 + (x_3 x_p) \quad (4.59)$$

$$y_7 = y_3 + (y_3 y_p)$$

Generalmente, las soluciones que se obtienen no son sensibles a la posición del polo, con tal de que el polo esté en una posición razonable. Como criterio importante, el polo debe ser ubicado en el origen, cuando el flujo emigra hacia el infinito ó poner el polo en el borde cuando el flujo se genera en el infinito.

## CAPITULO 5

### APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO EN EL ANALISIS DE INFILTRACION DE LA PRESA PRINCIPAL TINAJONES

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

La presa Tinajones fue diseñada y construida aproximadamente hace mas de 30 años, en esa época para su diseño no se contaba con las herramientas computacionales que existen en la actualidad para realizar el modelamiento matemático de su comportamiento frente a fenómenos como la infiltración. En este capítulo se presenta los resultados de un análisis de infiltración en modelo matemático utilizando para ello programas de cómputo para el análisis de infiltración como ELF y SEEP/W. Además, se presenta los resultados del procesamiento de las lecturas de los 60 piezómetros eléctricos instalados en las secciones 0+350, 0+850 y 1+850 de la presa principal Tinajones.

#### 5.2 ANTECEDENTES

La presa Tinajones fue construida en la región de Lambayeque en el periodo de 1967 a 1968 y fue puesta en servicio en 1969. La Presa Principal tiene una altura máxima de unos 41 m y su longitud de corona es de 2382 m; la sección transversal de la presa tiene núcleo central de arcilla y cuerpos de contención aguas arriba y aguas abajo del núcleo de materiales coluviales gravosos.

En el periodo de explotación del reservorio Tinajones, en tres ocasiones durante los años 1972, 1988 y 1998 se presentaron simultáneamente niveles máximos en el reservorio y lluvias de extrema intensidad(140 mm/24horas), conocidas como el fenómeno de El Niño. La coincidencia mencionada, estuvo acompañada de manifestaciones cada vez mas intensas de fisuras longitudinales en la corona de la presa principal, en una longitud aproximada de 1200 m. a partir de la margen derecha hacia la izquierda. Los asentamientos diferenciales de las partes de la corona de la presa separados por dichas fisuras son de 10 a 15 cm, mientras que

los asentamientos máximos totales de los hitos de la corona de la presa en el periodo 1969 a 1999 alcanzaron el valor de 80 cm.

### **5.3 DESCRIPCIÓN DE LA PRESA TINAJONES**

#### **5.3.1 Ubicación**

La presa terraplenada Tinajones y sus obras conexas fueron construida en el departamento de Lambayeque, a 50 km de la ciudad de Chiclayo, en la provincia de Chongoyape. Las coordenadas del sitio de la presa son 6.63° S; 79.39 W.

#### **5.3.2 Características**

El proyecto de irrigación Tinajones tiene por objeto la regulación de las aguas del río Chancay y las aguas del Atlántico provenientes de la cabecera de las cuencas de los ríos Chotano y Conchano. La estructura hidráulica principal lo constituye la Presa Tinajones ubicada fuera del cauce del río Chancay, en la cabecera del valle del mismo nombre. La presa tiene 41 m de altura que permite la regulación de 317 hm<sup>3</sup>; según el proyecto original. El embalse es alimentado por un canal principal de 70 m<sup>3</sup>/s de capacidad y 17 km de longitud. Si bien es cierto el riesgo potencial por efectos de las avenidas máximas del río Chancay es mínimo por la ubicación de la presa fuera del cause principal, hay quebradas (Yaypón y Chaparri) que drenan sus aguas directamente al embalse y constituyen un riesgo principal por desbordamiento del aliviadero de la Presa en los años en los que se presenta el fenómeno El Niño. Estas quebradas son también fuente importante de sedimentos hacia el embalse.

Otro aspecto importante que tiene que ver con la seguridad de la presa es el conocimiento de su ubicación en la zona 1 del mapa de zonificación sísmica del Perú.

Por su capacidad del embalse y altura de la presa, la Presa Tinajones está en la categoría de grandes presas y sus daños potenciales aguas abajo son altos en pérdidas de vidas humanas y significativa pérdida económica.

### 5.3.3 Descripción

El embalse Tinajones está conformado por una presa principal y tres diques secundarios los cuales fueron construidos con una cota de corona de 216.50 m.s.n.m para almacenar 317 millones de metros cúbicos con un Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) de 212.50 msnm y un Nivel de Aguas Mínimas Ordinarias (NAMI) de 185 msnm. La sección transversal de la presa está conformada por los siguientes elementos:

- Núcleo central de arcilla
- Cuerpos de contención aguas arriba y aguas abajo
- Blanket de arcilla
- Zanja de cimentación
- Capa de drenaje
- Protección de los taludes de la presa con materiales de enrocado y grava gruesa

#### 5.3.3.1 Núcleo

El núcleo central de arcilla presenta un ancho de corona de 4 m y pendientes simétricas de 4H:1V hacia aguas abajo y aguas arriba, el núcleo de la presa está empalmada con la carpeta de arcilla en el lado aguas arriba de la presa cuyo ancho es de 200 a 250 m, longitud de 250 m y espesor de 3 m.

En el fundamento del núcleo de arcilla se ejecutó la zanja de cimentación en la zona del cauce antiguo del río, con una profundidad máxima de 15 m aproximadamente, con ancho mínimo de 5 m y pendiente de taludes de 1.5H:1V rellena con arcilla. Existen indicios que durante el relleno de la zanja se han ido agregando aditivos de arcilla(cemento, bentonita) y que hubo problemas de desagüe en la zanja de cimentación.

El diseño original había previsto la ejecución de zonas de filtro aguas arriba y aguas abajo del núcleo pero durante la construcción se desistió de esa solución,

colocándose la capa filtrante F-1 solo en algunas partes de la zanja de cimentación y debajo de la carpeta aguas arriba(junto a la margen derecha), en un espesor de 0.60 m. En el lado aguas abajo se eliminó la capa superficial de arcilla, reemplazándose con la capa de drenaje F-2 de 1 m de espesor.

### **5.3.3.2 Cuerpo de la Presa**

Con contenido considerable de arena y limo. Las pendientes de los taludes externos son de 1:3 hasta la cota 190 msnm en el talud aguas arriba y 1:2.75 en el talud aguas abajo, a partir del nivel 190 hasta la cota 202.5 msnm la pendiente aguas arriba es de 1:3.25 y de 1:2.4 aguas abajo. A partir de la cota 202.5 hasta el nivel de coronación en la cota 216.5 msnm la pendiente aguas arriba es de 1:2.65 y la pendiente aguas abajo es de 1:2.2.

La corona de la presa de 9.0 m de ancho se ejecutó con sobre elevación para compensar el asentamiento esperado, en la cota 216.5 con la capa superior del núcleo de arcilla en la cota 215.5.

Las secciones transversales típicas de la presa donde se muestra la distribución de los materiales dentro del cuerpo de la presa se presentan en las figuras adjuntas.

## **5.4 ESTADO DE LA PRESA Y DIQUES DURANTE LA EXPLOTACIÓN**

El estado de la presa y los diques en el transcurso de su explotación puede dividirse claramente en dos periodos, primero desde 1969 hasta la ocurrencia de El Niño de 1983 y, segundo posterior a la reconstrucción de la corona de la presa entre 1988 y la nueva ocurrencia de El niño en 1997/98.

El primer periodo de explotación tuvo varios niveles altos en el reservorio alrededor de 212 msnm, de 1972 a 1976, y luego, en el periodo hasta 1982, cuando predominaron niveles bajos y precipitaciones de baja intensidad. La coincidencia de niveles altos y precipitaciones intensas de hasta 130 mm/24 horas se dió en el segundo período de niveles altos y según la documentación

existente fue entonces cuando se observó por primera vez la presencia de fisuras longitudinales y desplazamientos visibles persistentes en la corona de la presa. En este periodo hasta 1983 se registraron asentamientos de la corona del orden de magnitud de 50 a 70 cm. mientras que en el periodo de 1972 a 1982 los asentamientos alcanzaron velocidades aproximadas de 1cm/año.

Tras El Niño de 1983, aparecen asentamientos del orden de 10 cm y se presentan fisuras longitudinales, dando lugar a medidas de saneamiento de la corona de la presa, con la ejecución de la capa protectora (capa de imprimación) en un ancho de 7 m. La corona de la presa se formo en la cota 216 con un espesor de sobrecarga de grava de 95 cm y 5 cm de carpeta asfáltica con pendientes transversales de 2% con lo cual el ancho de corona resultó de 11 m. De modo similar se llevó a cabo la reconstrucción de los diques secundarios, en los que la carpeta asfáltica de 1.5 cm de espesor se conserva hasta hoy, con fisuras longitudinales menores pero visibles.

Durante el fenómeno de El Niño de 1997/98, aparecen nuevamente fisuras longitudinales abiertas y nuevos asentamientos de 8 a 10 cm como máximo con rotura de la capa de asfáltica en varios lugares, debido a la separación del relleno de grava a lo largo de las grietas verticales abiertas de un ancho máximo de 10-15 cm, que se presentan tanto aguas arriba como aguas abajo del núcleo de arcilla, paralelamente al eje de la presa y en un tramo de longitud aproximada de 1000 m.

En la corona de la presa son también visibles desplazamientos horizontales de ambos lados y son mas pronunciados entre las progresivas 1+650 y 2+150.

#### **5.4.1 Problema de Fisuramiento**

Las fisuras y grietas presentes en la corona de la Presa Principal Tinajones fueron detectadas en base a:

- Observaciones visuales en el transcurso del periodo de su explotación, especialmente en los periodos donde se manifestaba con mayor intensidad,

que coincidían con las ocurrencias de niveles altos en el reservorio y precipitaciones extraordinarias como las causadas por el fenómeno El Niño.

- Análisis de los asentamientos medidos de la presa durante el periodo de su explotación, considerando que las deformaciones, fisuras y grietas longitudinales y desnivelación de la corona han tenido lugar en la parte de la presa donde se han medido los mayores asentamientos, esto ha tenido lugar entre la progresiva 1+500 y el estribo derecho de la presa.
- Realizando un análisis minucioso de las características y propiedades físico-mecánicas, de clasificación y permeabilidad de los diferentes materiales componentes del cuerpo de la presa (núcleo de arcilla y cuerpo de contención gravoso de la presa).

#### **5.4.2 Causas de las Fisuras**

Conforme a las observaciones visuales realizadas al estado de la corona de la presa, se puede decir que a partir del fenómeno de El Niño de 1972, aparecen fisuras longitudinales, que alcanzan anchos y largos considerables durante el Fenómeno El Niño de 1982-1983; después de este fenómeno se constató la presencia de fisuras de hasta 1.50 metros, lo cual llevó a un proceso de rehabilitación de la corona. Para tal fin se realizaron las siguientes medidas:

- Fue removida una capa de 40 cm de espesor
- Se hizo reemplazo con grava compactada de 35 cm de espesor
- Colocando encima una capa asfáltica de 5 cm. de espesor, con una pendiente de bombeo de 2% a ambos lados del eje de la corona.

El estado de la presa encontrado en 1998 y 1999 verificado con un mayor número de excavaciones de sondeo, indica que la reconstrucción de la corona de la presa de 1984/85 se efectuó la corrección parcial de la cota de coronación a la

cota 216.00 msnm. Esta sobre elevación se realizó variando el espesor de la capa de grava sobre el núcleo. Pero esto no impidió la aparición de nuevas fisuras en el fenómeno de El Niño de 1998.

De acuerdo a las observaciones mencionadas, las fisuras se presentan en forma y número cada vez más intensos después de cada fenómeno El Niño lo que indica como causa básica del deterioro de la misma. Otro aspecto importante que hay que tener en cuenta es que las fisuras se han presentado en la zona donde la presa presenta mayores asentamientos del orden de 80 cm. Esto es, entre las progresivas 1+500 y la margen derecha de la presa. A continuación se detallan las causas principales.

#### **5.4.2.1 Causa de El Niño – Eventos Hidrológicos.**

Al realizar un diagrama donde se muestra niveles de embalse y precipitaciones máxima mensual en 24 horas para el periodo 1969 – 2000, se observa claramente la coincidencia de los niveles altos en el reservorio con las precipitaciones de marcada intensidad denominadas éstas como el fenómeno de El Niño, habiendo estas coincidencias en los años 1972, 1983, 1998 ocasionando la aparición de fisuras longitudinales pronunciadas en la corona de la presa. Estas fisuras tenían desplazamientos desiguales y separaciones cada vez mayores. Inclusive la reconstrucción de la corona de la presa realizada entre 1984/85 no contribuyó a que se produzcan desplazamientos desiguales, durante el siguiente fenómeno El Niño de 1998, en vista que dicha capa de asfalto se rompía fácilmente y permitía que el agua de precipitación penetre en las grietas.

Los llenados y vaciados alternados del reservorio favorecen la formación de desplazamientos irreversibles en la dirección perpendicular del eje de la presa, así como el arrastre gradual de fracciones grano fino, de la parte alta de la presa.

#### **5.4.2.2 Causa de Asentamiento**

El sistema de auscultación de asentamientos de los hitos de control topográfico, dispuestos en el eje de la corona de la presa, se mantuvo funcionando hasta la



reconstrucción en el periodo de 1984-85, por lo que estos datos fueron reinterpretados. Es innegable que la parte de la presa donde se presentan grandes fisuras y desnivelaciones ha sufrido un asentamiento de la corona del orden de 60- 80 cm después de su construcción.

Los desplazamientos verticales no han ocurrido en magnitudes iguales tanto en el núcleo y los cuerpos de apoyo, por lo cual, en la zona de contacto entre el núcleo y el espaldón se han producido fisuras longitudinales y transversales.

La disposición en planta de estos hitos se muestra en la Lámina 5.1

Basándose en las mediciones de asentamientos en los 11 hitos de control topográfico dispuestos a lo largo de la corona se pudo observar. En el periodo anterior al fenómeno el Niño de 1983 los asentamiento fueron a razón de 2 cm/año, alcanzando el 1% de la altura total de la presa, un total de 40 cm. esto fue cubierto por la contraflecha de la corona hasta la cota de 216.40 msnm.

La parte de la presa entre las progresivas 1+682 y el estribo derecho, sufrió un asentamiento tras la ocurrencia del fenómeno de El Niño de 1983 alcanzando valores de asentamiento entre 60 y 70 cm.

En el periodo siguiente hasta la ocurrencia del fenómeno El Niño de 1998 se caracteriza por un incremento moderado del asentamiento del orden de 0.5 a 1.5 cm/año, pero siempre con asentamientos mayores entre las progresivas 1+682 y 2+079.

#### **5.4.3 Tipos de Fisuras y Grietas**

Mediante el mapeo y prospección visual de los trabajos de investigación se registraron grietas y fisuras de los siguientes tipos:

### **5.4.3.1 Fisuras Continuas**

Las capas de gravas colocadas junto al núcleo y encima de él, son muy variables en su composición y en el contenido de gravas, principalmente en cuanto al contenido de fracciones de grano fino (arcilla y limo), sin embargo la grava sin trazas de arcilla se encuentra a la profundidad de 1.00 metros y luego aparece grava con arcilla lo que favorece la penetración de agua atmosférica, llenando la capa de grava cerca a la superficie, con acción erosiva del agua pronunciada en las fisuras y la erosión del contenido de finos y su transporte a lo largo de las fisuras.

Las fisuras claramente visibles en la corona de la presa, a lo largo de las cuales se produce la desnivelación de la superficie, ocurre una separación hacia aguas arriba y aguas abajo. Estas fisuras alcanzan una profundidad de 5 metros.

### **5.4.3.2 Fisuras Abiertas por Empuje y Agrietamientos Lavados.**

La acumulación de agua en la superficie de la corona, la cual no es evacuada crea un nivel de agua estacionario, que al infiltrarse crea una presión hidrostática de varios metros (3 a 4 metros) representado una fuerza horizontal de 50 a 80 KN/m, que puede extender la profundidad de las fisuras, esto facilita la circulación del agua, por consiguiente el arrastre de partículas de grano fino. Esto podría traer consigo el fenómeno de tubificación.

### **5.4.3.3 Fisuras de Contracción**

El núcleo de arcilla, como barrera impermeable, no en todas partes se extiende con certeza a la profundidad de 1.00 metros por debajo del nivel de aguas máximo extraordinario, es decir a la cota 213.20, encontrándose en el caso más desfavorable hasta en una profundidad de 3.60 m. por debajo de este nivel.

El estado de compacidad del núcleo de arcilla es favorable, es decir corresponde a los criterios de densidad máxima de laboratorio (>95%). El estado de humedad resulta muy variable, alcanzando valores reducidos hasta en un 50% de la

humedad óptima, para niveles que están por encima del nivel de agua reservorio. Este estado favorece a la generación de contracciones, es decir, la aparición de fisuras por desecación.

## **5.5 HIDROLOGIA**

En toda obra de almacenamiento es básico un estudio de máximas avenidas y sedimentación, el primero para diseñar el aliviadero de demasías y obras de protección y el segundo para determinar el volumen muerto por sedimentación.

### **5.5.1 La Cuenca**

La cuenca donde se encuentra ubicada la Presa Tinajones, le corresponde al río Chancay, el cual nace cerca de la divisoria continental a 4000 m.s.n.m descargando en el Océano Pacífico, después de regar 5000 km<sup>2</sup>.

Políticamente la cuenca se encuentra entre los departamentos de Lambayeque y Cajamarca, geográficamente se encuentra ubicada entre 79° 10' – 80° 00' en longitud oeste y los 6° 10' – 6° 50' de latitud sur.

Morfológicamente la cuenca se caracteriza por tener valles angostos en las zonas altas y montañosas, en la parte media y baja el valle es más amplio, dando lugar a poblaciones rurales y terrenos de cultivos.

El proyecto de irrigación Tinajones contempla la necesidad de transvasar los aportes de los ríos Chotano, Conchano y Llaucano de la cuenca del Río Marañón, a la fecha se han concretado los dos primeros transvases. Desde el punto de vista hidroenergético destaca la construcción de la central hidroeléctrica de Carhuaquero. Los parámetros fisiográficos de las subcuencas aledañas al embalse Tinajones se presentan en el Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Parámetros fisiográficos de las subcuencas

PARAMETRO FISIOGRAFICO	SUBCUENCAS			
	CHAPARRI	AREQUIPEÑA	PALO BLANCO	MAGIN
Área de captación(km <sup>2</sup> )	67	80	148	167
Perímetro(km)	38	54	61	87
Pendiente media(%)	23	27	33	34
Longitud (km)	15	21	27	39
Altitud media (msnm)	450	850	800	1200
Densidad de drenaje	0.23	0.26	0.18	0.24
Pendiente curso principal	3.3%	5.60%	8.1%	8.9%
Factor de forma	0.30	0.18	0.20	0.11
Índice de compacidad	1.30	1.75	1.45	1.95

La ubicación y periodo de funcionamiento de las estaciones pluviométricas se presentan en la Tabla 5.2. En la Lamina 5.5 se presenta el la variación de la precipitación máxima en 24 horas para los años de funcionamiento de la Presa.

Tabla 5.2 Estaciones Pluviométricas

ESTACIÓN	ALTITUD (msnm)	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PERIODO
Huambos	200	6° 27'	78° 58'	1964 – 95
Puchaca	500	6° 21'	79° 28'	1963 – 98
Llama	2100	6° 30'	79° 07'	1964 – 86
Tinajones	240	6° 40'	79° 29'	1963 – 99
Incahuasi	3100	6° 14'	79° 19'	1964 – 94
Tocmoche	1250	6° 25'	79° 22'	1983 – 98
Hda. Pucalá	85	6° 45'	79° 36'	1968 – 98
Hda. Quilcate	3100	6° 49'	78° 48'	1964 – 96
Chugur	2744	6° 40'	78° 40'	1964 – 98
Sta. Catalina	2605	6° 44'	78° 55'	1964 – 836
Reque	21	6° 53'	79° 51'	1965 – 88
Ferreñafe	67	6° 38'	79° 47'	1964 – 96
Lambayeque	18	6° 42'	79° 55'	1983 – 96

## 5.6 EXPLORACION GEOTECNICA

Se ha efectuado excavaciones abiertas tipo trincheras – calicatas en la corona de la Presa Principal Tinajones según lo programado.

Estas exploraciones permiten conocer la estratigrafía, composición y alteración si la hubiere de los materiales constitutivos de la corona. Para lo cual se realizaron ensayos de densidad de campo a diferentes profundidades.

Se ha procedido a extraer de la excavaciones muestras alteradas e inalteradas a profundidades promedio de 3m y 6m , las cuales son ensayadas con procedimientos estándar y especiales en los laboratorios del Consorcio HARZA – HIDROENERGIA y del CISMID de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA. En el presente trabajo se presenta los resultados de dichos análisis.

### 5.6.1 Trincheras

#### 5.6.1.1 Trinchera T-1 (Km 0+351.50)

- **CAPA N° 1 (0.20 m-1.00 m) - M-1**

Grava arenosa, color marrón claro, matriz arena medio gruesa, con gravas subredondeadas, 45% menores y 10% mayores de 3", tamaño máximo 7", estado compacto con raicillas aisladas, con limo medianamente húmedo a seco.

- **CAPA N° 2 (1.00 m-2.10 m) M-2**

Grava limosa, color marrón claro con matriz limosa, contiene raicillas aisladas en estado compacto, con gravas, subredondeadas menores de 3", grava tamaño máximo 7" de diámetro.

- **CAPA N° 3 (0.90 m-2.10 m) - M-3**

Grava arenosa con matriz de arena media a gruesa, color plomizo, en estado semi-compacto con gravas menores de 3" subredondeadas.

- **CAPA N° 4**  
Enrocado

#### 5.6.1.2 Trinchera T-2 (Km 0+851)

- **CAPA N° 1 (3.00 m – 5.00 m) M-1**  
Grava arenosa, color gris plomizo, matriz de arena gruesa, con presencia de limo en estado compacto, contiene gravas subredondeadas 35% menores de 3", presencia de raicillas. Tamaño máximo de la grava 8" de diámetro.
- **CAPA N° 2 (3.00 m – 6.00 m) - M-2**  
Grava arcillosa limosa de color marrón claro matriz de arcilla limosa, de mediana a baja plasticidad, consistencia compacta, con raicillas aisladas, de gravas subredondeadas. Presenta 35% de menor a 3" y 5% de gravas mayor de 3"
- **CAPA N° 3 (2.00 m – 6.00 m) - M-3**  
Arcilla color marrón oscuro (mezcla de material arcilloso orgánico con arcilla inorgánica). De mediana a alta plasticidad de consistencia compacta, con arenillas y gravillas aisladas con manchas blancas.

#### 5.6.1.3 Trinchera T-3 (Km 1+196.40)

- **CAPA N° 1 (0.20 m-0.55 m)**  
Grava arenosa con presencia de limo, color plomizo, con gravas subredondeadas, son raicillas aisladas, en estado compacto.
- **CAPA N° 2**  
Presenta bolonería mayor a 4", con escasa presencia de limos, tipo arenisca cuarcífera.
- **CAPA N° 3 (0.56 m-1.35 m)**

Grava arcillosa, color amarillo, con matriz de arcilla, de plasticidad media, zona no compactada, presenta gravas subredondeadas menores de 3". Tamaño máximo de 12".

- **CAPA N° 4 y N° 5 (1.25 m-1.35 m)**  
Arcilla inorgánica de color plumizo, de mediana a alta plasticidad, de consistencia compacta.
- **CAPA N° 6 (1.50 m-2.30 m)**  
Grava arenosa con escasa presencia de limos de color plumizo, con gravas sub-redondeadas menores de 3" y 10% mayores de 4".
- **CAPA N° 7 (1.45 m-1.80 m)**  
Limo arcilloso de color amarillo de baja plasticidad de consistencia compacta.

#### 5.6.1.4 Trinchera T-4 (Km 1+502.55)

- **CAPA N° 1 (0.20 m – 0.50 m)**  
Grava arenosa, con presencia de limos color plumizo, con gravas subredondeadas con tamaños menores de 3" en una matriz de arena gruesa, en estado compacto.
- **CAPA N° 2 Y CAPA N° 4 (0.5 m-1.20 m)**  
Grava arcillosa con arenilla de color amarillento, matriz de arcilla, de mediana plasticidad, de consistencia compacta con gravas subredondeadas menores de 3".
- **CAPA N° 3 (1.20 m-2.20 m)**  
Arcilla de color marrón, mediana a alta plasticidad, de consistencia compacta con grietas de contracción.

- **CAPA N° 5**  
Enrocado de protección de bloques de tamaño máximo 12" x 16" de diámetro.
  
- **CAPA N° 6 (1.50 m-2.50 m)**  
Grava limosa arenosa de color marrón con raicillas, gravas subredondeadas, algo compacta con matriz areno-limosa, presencia de gravas aisladas mayores de 4".

#### 5.6.1.5 Trinchera T-5 (Km 1+819)

- **CAPA N° 1**  
Material de núcleo.
  
- **CAPA N° 2**  
Grava arcillosa.
  
- **CAPA N° 3**  
Grava bien graduada con presencia de limos.
  
- **CAPA N° 4**  
Grava arcillosa limosa.

#### 5.6.1.6 Trinchera T-6 (Km 1+985)

- **CAPA N° 1**  
Material de núcleo.
  
- **CAPA N° 2**  
Grava arcillosa.
  
- **CAPA N° 3**  
Grava mal graduada con matriz de arena, contaminada.



**5.6.1.6 Trinchera T-8 (Km 1+350.30)**

- **CAPA N° 1 (3.00 m – 4.00 m)**  
Grava arenosa de color gris plomizo, con raicillas, de matriz arenosa limosa a gruesa con presencia de gravas subredondeadas menores a 3” en un 35% y 15% mayores de 3”.
- **CAPA N° 2 (5.00 m-6.00 m)**  
Grava arcillosa de color amarillo, con matriz de arcilla de mediana a alta plasticidad de consistencia compacta, gravas subredondeadas menores de 3” en un 25% y 10% mayores de 3”.
- **CAPA N° 3 (4.00 m-5.00 m)**  
Grava limosa de color marrón de matriz de limo de baja a mediana plasticidad de consistencia compacta con raicillas aisladas, gravas subredondeadas menores de 3” en un 15% y 5% mayores de 3” en estado suelto por falta de compactación.
- **CAPA N° 4 y N° 5 (5.00 m-60.00 m)**  
Arcilla de color marrón oscuro de mediana a alta plasticidad de consistencia compacta con arenilla (mezcla de arcilla orgánica con inorgánica), gravas aisladas mayores a 3” y gravas finas subangulosas a subredondeadas.

**5.6.1.7 Trinchera T-9 (Km 1+930)**

- **CAPA N° 1**  
Grava arenosa de color gris plomizo, con gravas subredondeadas, 15% menores de 3”. En estado compacto en matriz de arena media a gruesa con arcilla y escasa presencia de limo.
- **CAPA N° 2**

Grava arcillosa de color marrón, con matriz de arcilla de mediana plasticidad, de consistencia compacta. Gravas subredondeadas menores de 3" en 38% y 5% mayores de 3".

- **CAPA N° 3**

Arcilla orgánica, color marrón oscuro, de media a alta plasticidad, de consistencia compacta, con arenillas, gravillas (mezcla de tierra de cultivo con arcilla inorgánica) con gravas semiangulosas aisladas. Grietas con raicillas a lo largo de la trinchera con grietas de contracción.

- **CAPA N° 4**

Grava limosa arcillosa de color marrón gravas subredondeadas, con matriz limo-arcillosa, de baja a mediana plasticidad, gravas menores de 3" en un 25% y 5% mayores de 3" y tamaño máximo de 12".

- **CAPA N° 5**

Enrocado.

### 5.6.2 Perforaciones Diamantinas

De acuerdo con el programa de investigación geotécnica, se han realizado un total 05 sondajes de perforación diamantina. El sondaje P-1 de 70 m de profundidad en la progresiva 1+819 ubicado en la corona, el sondaje P-2 de 30 en la misma progresiva pero en el pie aguas abajo del talud, el sondaje P-3 de 50 m en la progresiva 0+850 ubicado en la corona, el sondaje P-4 de 30 en el pie del talud en la progresiva 0+850 y el sondaje P-5 en el pie del talud de 55 m en la progresiva 2+100.

En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de los sondajes realizados en el programa de exploración geotécnica.

**Tabla 5.3: Perforaciones Diamantinas**

SONDAJE	KM	LUGAR	PROFUN (m)	MATERIAL
P-1	1+819	Corona	70	Aluvional
P-2	1+819	Pie de talud	30	Aluvional
P-3	0+850	Corona	50	Aluvional
P-4	0+850	Pie de talud	30	Aluvional
P-5	2+100	Corona	55	Roca muy alterada

El núcleo impermeable está constituido por arcillas y delgados estratos de limo en forma de lenticillos.

Se ha encontrado en algunas zonas presencia de materia orgánica lo que responde a una contaminación del suelo, fenómeno no inusual en presas de materiales sueltos.

En el sondaje P-5, progresiva 2+100, se ha detectado a los 14.65 m una zona de falla transversal.

El núcleo en la progresiva Km. 0+850 muestra alta consistencia. Se confirma por inspección la aplicación de bentonita en la roca alterada en la cimentación de la Presa.

Se ha colocado tubería PVC en los sondajes P-1, P-3 y P-5 hasta los 50 m de profundidad, para la colocación de instrumentación piezométrica y la ejecución de ensayos geofísicos.

Se ha ejecutado ensayos de permeabilidad tipo Lefranc a cada 5m de profundidad.

### **5.6.3 Exploración Geofísica**

#### **5.6.3.1 Penetración del Terreno por Radar (GPR)**

Se ejecutó ésta exploración en tres líneas de 600 m paralelas al eje de la presa en la zona crítica entre las progresivas Km 1+600 y Km 2+200, y cuatro líneas transversales de 50m y tres paralelas al eje en la zona no afectada por las grietas con fines de comparación, entre las progresivas Km 0+675 a Km 1+025.

#### **5.6.3.2 Resistividad Geoelectrica**

Dada la existencia de una secuencia estratigráfica sedimentaria de capas superpuestas en forma casi horizontal fue necesario determinar la variación de la resistividad – conductividad con la profundidad y una información de este tipo se puede conseguir empleando el dispositivo tetraelectródico Weener; para tal efecto se llevó a cabo doce (12) Sondajes Eléctricos Verticales – SEV en la Presa Principal Tinajones.

La técnica de los SEV se fundamenta en el estudio de las variaciones de los parámetros físicos de la roca o de los suelos y dependen de factores como, grado de saturación de los sedimentos, humedad, litología, etc. Orientada a definir áreas y zonas de estructuras donde predominan estratos de alto y bajo grado de permeabilidad.

#### **5.6.3.3 Trabajo de Campo y Gabinete**

El trabajo de campo se desarrolló de acuerdo a lo previsto durante 3 días del 21 al 23 de Julio del presente 2000 incluyendo el reconocimiento de campo, se ha tenido en cuenta un control geológico y topográfico disponible con el fin de poder elaborar un programa adecuado a las características y comportamiento de las respuestas físicas. El tendido de los cables eléctricos de los dipolos A-B fueron de hasta 480 mts, a fin de obtener mayor información en profundidad.

Para tal objetivo se ejecutaron los SEV en los puntos pre-establecidos en el programa; 4 SEV en la corona; 4 SEV en el sector lateral aguas arriba y 4 SEV en el sector lateral aguas abajo del dique, tal como se muestra en el plano de ubicación.

El trabajo de gabinete ha consistido en analizar los resultados, controlando los parámetros físicos de resistividad aparente mediante un programa computarizado de software de inversión de resistividades.

#### **5.6.3.4 Resultados**

Como resultado de los doce (12) Sondajes Eléctricos Verticales SEV ejecutados en el área de la Presa Principal Tinajones, se ha graficado siete perfiles geoelectrónicos A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F' y G-G', 03 longitudinales y 04 transversales al dique de la presa.

### **5.7 SISMICIDAD**

#### **5.7.1 Marco Sísmico Tectónico**

La costa del Perú se encuentra localizada frente al límite de las placas Nazca y Sudamericana. Este límite de placas representa uno de los procesos de subducción más activos del mundo, con la placa de Nazca sumergiéndose a unos 12° a 25° bajo la placa continental sudamericana y a una velocidad aproximada de 5 a 10 cm/año. Este proceso ha generado una cadena de volcanes en el sur del Perú. Sismos mayores de magnitudes mayores a 8 han sido experimentados en la costa del Perú.

Las características de la zona de subducción corresponde a lo que algunos investigadores llaman un modo de subducción Chilena " en el que la placa superior se mueve hacia la placa que subduce y hay un acoplamiento entre las dos placas.

Las magnitudes máximas registradas de los sismos en la zona Wadati – Benioff son de 8.25, han alcanzado profundidades máximas promedio de 300 km. Sin embargo se han registrado unos pocos eventos aislados hasta profundidades de 600 km.

Adicionalmente, la orogénesis que ha levantado la cordillera de los Andes, es producto del empuje de la zona de subducción hacia la margen continental. Es en consecuencia de estos empujes y plegamientos, la aparición de varios sistemas de fallas someras y corticales. Por lo tanto el régimen de esfuerzos en el sitio es compresional, con dirección normal a la costa y la cordillera andina, induciendo éstas en la corteza una serie de fallas inversas con una dirección predominantemente N a NW.

En el sitio de la presa Tinajones la sismicidad es relativamente mas baja que en otras regiones cercanas, además se ha observado que los eventos en un radio de 100 km. del sitio tienen profundidades en su mayoría en un rango de 70 a 300 km., hay un segundo grupo de eventos de relativa importancia con profundidades entre 30 a 70 km.

### **5.7.2 Amenaza Sísmica**

Los resultados del análisis de amenaza sísmica, evaluando mediante un enfoque probabilístico de acuerdo a los lineamientos de Cornell(1968) se expresan como una relación entre el periodo de retorno y el nivel de aceleración pico. En el caso del sitio de la presa Tinajones, esta relación indica un valor de 0.45g para un periodo de retorno de 6667 años. Este periodo de retorno obedece a las exigencias del Comité de Sismos del Comité de Grandes Presas de los Estados Unidos(USCOLD, 1996). El nivel de amenaza sísmica que se ha evaluado para el sitio se clasifica como alto-moderado a pesar de que en el Perú se han registrado algunos de los sismos de mayor magnitud y devastadores del mundo. La información que se presenta en este trabajo fue recopilada del estudio de peligro sísmico realizada por el Dr. J. Alva en el año 2000.

### 5.7.3 Determinación del Coeficiente Sísmico

Para calcular el coeficiente sísmico se asume que la presa se comportará como un cuerpo rígido por lo que debido al sismo se producen aceleraciones uniformes iguales en cualquier sección de la presa además de ser iguales a la aceleración máxima del terreno. Se debe tener en cuenta que el valor del coeficiente sísmico depende entre otros factores de la sismicidad de la zona, condiciones de cimentación, periodo fundamental del depósito e importancia de la obra. En la Figura 5.4 adjunta se presenta la zonificación del Coeficiente Sísmico para Presas de Tierra y Enrocado en el Perú (Ruesta et. al., 1998). Se puede observar que para presas de tierra el coeficiente sísmico varía entre 0.15 y 0.25 en la zona I, de 0.10 – 0.15 en la zona II y finalmente de 0.05 – 0.10 en la zona III. El proyecto en mención se encuentra ubicado en la zona I, para el cual asumimos un coeficiente sísmico de 0.15 el mismo será utilizado en el análisis de estabilidad pseudo estático.

## 5.8 INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN LA PRESA TINAJONES

Con la finalidad de realizar un control del comportamiento de la estructura durante la etapa de construcción, etapa de prueba y su vida útil, se instaló una serie de instrumentos y mediante estos se realiza una auscultación periódica.

### 5.8.1 Piezómetros

Se instalaron 60 piezómetros Maihak modelo MDS 75 para monitorear las presiones intersticiales en el cuerpo y la cimentación de la Presa. Estos instrumentos son piezómetros eléctricos de cuerda vibrante, que fueron instalados a razón de 20 en cada una de las tres secciones instrumentadas (progresivas 0+350, 0+850, 1+850). Estos piezómetros están distribuidos (11) en el núcleo, (3) en el tapete impermeable(blanket) aguas arriba y (6) en el terreno de fundación.

La ubicación de los piezómetros dentro del cuerpo de la presa se presenta en las Láminas 5-12, 5-13 y 5-14 para las secciones 0+350, 0+850 y 1+850 respectivamente. En estas láminas también se indican las cotas de instalación.

Los piezómetros Maihak se dividen en dos clases por su rango de medición: el primer grupo cuyo rango de medición es de 0 a 8 kg/cm<sup>2</sup> para los piezómetros N°2 y N°7 de la sección 1+850 y los piezómetros N°4 y N°8 de las secciones 0+350 y 0+850, el resto de piezómetros tiene un rango de medición de 0 a 4 kg/cm<sup>2</sup>.

Además se instalaron 06 piezómetros abiertos provistos de limnigrafos para registrar de manera ininterrumpida la variación del nivel freático en el pie del talud aguas abajo (ver Lámina 5-03).

En el año 2000 aprovechando las perforaciones diamantinas realizadas como parte del programa de exploración geotécnica del Proyecto "Estudio en modelo Matemático del Comportamiento Futuro de la Presa Tinajones y su Fundación" se instalaron 04 piezómetros abiertos en el cuerpo de la presa.

En la siguiente Tabla se muestra la ubicación y las lecturas en los piezómetros instalados.

**Tabla 5.4: Piezómetros instalados en el año 2000**

UBICACION	SONDAJE	LECTURA (m)	COTA PIEZOMETRICA	COTA DE INSTALACION	COTA SUPERFICIE	mH <sub>2</sub> O
Aguas Abajo Km. 1+819	P-2	2.075	176.95	174.03	179.025	2.925
Corona Km. 0+850	P-3	15.20	200.80	166.00	216.000	34.80
Aguas Abajo Km. 0+850 al pie del Talud	P-4 <sup>a</sup>	1.94	182.46	160.00	184.400	22.46
Aguas Abajo Km. 0+850 al pie del Talud.	P-4B	3.78	180.62	169.40	184.400	11.20

### 5.8.3 Vertederos de Aforo

Se instalaron 4 vertederos para medir el caudal de filtración, uno en la presa principal y los tres restantes en los diques 1A, 2A y 3A.



### **5.8.3.1 Placas para el Control de Asentamiento**

Se instalaron 19 placas para el control de asentamientos ubicadas en las mismas secciones anteriores, distribuidas a razón de 6 en cada sección, con excepción de la sección 1+850 donde se instaló 7 piezómetros. Estas placas están distribuidos (2) aguas arriba, (1) en la corona y (3) hacia aguas abajo. Actualmente se encuentran fuera de servicio.

También se instalaron 11 hitos de nivelación y alineamiento ubicados en el eje de la corona de la presa, debidamente protegidos con un tubo metálico previsto de una tapa a presión, de éstos solo 8 se controlan altimetricamente.

Existen 4 hitos adicionales para controlar el alineamiento del eje de la presa (uno en la margen izquierda designada como PP-1 y otros dos designados como PP-2 y PP-3 en la margen derecha. El cuarto hito denominado PI se encuentra ubicado cerca del estribo derecho.

## **5.9 AUSCULTACION DE LA INSTRUMENTACION INSTALADA**

En esta sección se describe el proceso de auscultación de la instrumentación instalada en la Presa Principal Tinajones, los registros del control topográficos para medir los niveles de asentamiento y los datos de las lecturas en los piezómetros para el control de las presiones de poro.

### **5.9.1 Control de Asentamiento**

En la Lámina 5-16 se muestra el comportamiento del asentamiento de la corona medidos periódicamente en los hitos de control. Los registros encontrados corresponden al periodo 1968 a 1984. En 1985 se realizó una rehabilitación de la corona de la Presa donde los hitos de control fueron removidos, a partir de esta fecha se reiniciaron las mediciones tomando como referencia la nueva posición de los hitos.

## **5.9.2 Auscultación de Piezómetros**

La variación de la presión intersticial dentro del cuerpo de la Presa, son controlados a través de las mediciones periódicas con los piezómetros eléctricos y piezómetros abiertos instalados en las perforaciones.

### **5.9.2.1 Obtención de Datos**

Los valores de lecturas piezométricas han sido tomados en frecuencias absolutas Hertz(Hz), éstos son transformados a unidades absolutas propias de la firma Alemana Maihak. El instrumento de medición a control remoto obtiene las lecturas en unidades de corriente (Amperios). Dichos valores de lectura son transformados a frecuencia mediante una escala arbitraria de 0 500 unidades a unidades absolutas transducidas.

El nuevo instrumento de medición establece una frecuencia de 720 Hz para la frecuencia cero y 973 Hz para la frecuencia final.

### **5.9.2.2 Procesamiento de Datos**

Para determinar el valor de la presión de poros se calcula la diferencia de los valores absolutos inicial y actual, en unidades absolutas transducidas, multiplicadas por una constante de calibración(k), se obtiene la presión en kilopascales. El valor de k para cada piezómetro fue proporcionado por INADE-DEPOLTI (Dirección Ejecutiva del Proyecto Olmos Tinajones).

En como parte de este trabajo de tesis se ha procesado todo el registro de datos a partir de 1986. Estos resultados son presentados en el Anexo A. También se ha hecho una correlación gráfica entre el valor de la presión para cada piezómetro y el nivel de embalse en el tiempo.

Los resultados gráficos de este proceso se presentan en las Láminas 5-15-A al 5-15-R, donde se muestra la variación de la presión de poros en función del tiempo y el nivel de embalse.

### 5.9.2.3 Análisis de Resultados

Al observar la tendencia que siguen los valores de presión en el tiempo comparadas con el nivel de embalse, se muestra la respuesta de estos con la variación del nivel de agua en el reservorio. En base a estos resultados se infiere lo siguiente.

- A nivel de fundación, los piezómetros ubicados aguas arriba de la presa, siguen cercanamente los cambios en el nivel del embalse, mientras que los piezómetros ubicados aguas abajo de la presa muestran una respuesta mas lenta y un valor absoluto menor en el cambio de los niveles piezométricos. Esto indica que el blanket impermeable es relativamente ineficaz en la reducción de la conexión entre el embalse y la parte aguas arriba de la fundación.
- En la sección 1+850 el blanket parece ser mas eficiente en las cercanías al núcleo (Los piezómetros N°9 y N°10 tienen lecturas mas bajas que el N°8). Se tiene evidencia que el blanket en esta zona fue construido de mayor espesor que en la porción aguas arriba. En la sección 0+350 las lecturas del piezómetro N°10 permanecen altas aun cuando el embalse permanece bajo, no se puede precisar con certeza la razón de este comportamiento.
- Los piezómetros ubicados en el cuerpo de la Presa siguen cercanamente la variación de los niveles de embalse, cuando este nivel permanece por encima de estos instrumentos, las lecturas realizadas en junio del 2000 son similares, a las lecturas de otras fechas con los mismos niveles de embalse, esto indica un comportamiento adecuado de estos piezómetros.
- El piezómetro N°8 ubicado en la trinchera impermeable de la sección 0+350 muestra una respuesta rápida a los cambios en el nivel del embalse, siendo la magnitud de los cambios piezométricos casi igual a los cambios en el nivel del embalse.

## **5.10 ANALISIS DE FILTRACION EN LA PRESA TINAJONES (SECCION 1+850)**

Con el objeto de averiguar el comportamiento teórico de la presión intersticial dentro del cuerpo de la presa se ha realizado un modelamiento matemático del fenómeno de infiltración, haciendo uso para este propósito de un programa de cómputo basado en la técnica de los elementos finitos.

Durante el periodo de explotación de la Presa, el agua fluye desde el embalse, definiendo éste un flujo con trayectoria que se orienta hacia aguas abajo de la Presa, dicho flujo debe ser controlado con la finalidad de evitar que afecte la integridad de la estructura. Como consecuencia de esto se pueden generar los siguientes fenómenos.

- Presiones de poro que afecten la estabilidad aguas abajo de la presa.
- Erosión interna o tubificación, por causa de la salida de flujo en el talud aguas abajo.

Se ha realizado una simulación de flujo de agua a través del cuerpo de la Presa y de su fundación, para el cual se ha hecho un análisis numérico de filtración bidimensional, con el objeto de cuantificar el caudal de filtración, determinar la ubicación de la línea superficie freática y la distribución de las presiones de poro dentro del cuerpo de la Presa.

Para realizar esta simulación en modelo matemático se ha hecho uso de dos programas de cómputo, SEEP/W de GEOSLOPE y ELF. a continuación se presentan las consideraciones mas importantes tomadas para la utilización de estas herramientas de cómputo.

### **5.10.1 Programa de Elementos Finitos SEEP/W**

SEEP/W es un programa de cómputo que utiliza el método de los elementos finitos, desarrollado para el modelamiento del movimiento del agua y la

distribución de la presión intersticial dentro de materiales como suelos y rocas. La formulación desarrollada permite el análisis de problemas complejos de infiltración el cual se aplica en el análisis y diseño de proyectos de ingeniería civil en el área de la geotecnia.

La formulación de SEEP/W se basa en los principios de la ley de Darcy para el movimiento de fluidos en un medio poroso y en segundo término se basa en la ecuación general de continuidad de Laplace, que es aplicable a suelos con propiedades anisotrópicas saturadas, con régimen establecido (flujo de agua que no modifique la estructura del suelo).

#### **5.10.1.1 Parámetros Utilizados**

Para modelar el fenómeno de filtración en la sección 1+850 de la Presa Tinajones, se utilizaron parámetros teóricos que fueron asignados a cada tipo material integrante de la estructura (ver Tabla N°5.4).

SEEP/W utiliza la función de Conductibilidad Hidráulica para modelar las propiedades del material. La función de Conductibilidad Hidráulica es la variación del valor de permeabilidad en función de la presión, esto ya fue tratado en la sección 4.3 de este trabajo. En el Anexo I se presentan funciones de Conductibilidad Hidráulica característica para diferentes tipos de materiales. Además los valores de permeabilidad han sido determinados mediante ensayos in-situ.

#### **5.10.2 Programa de Elementos Finitos ELF**

Programa de cómputo desarrollado en la Universidad de Illinois U.S.A. para el análisis de infiltración en medios porosos. Este programa utiliza el método matemático de discretización de los elementos finitos para modelar dicho fenómeno.

### 5.10.2.1 Procedimiento de Cálculo

Se ha elaborado un análisis de flujo no confinado por el método de los elementos finitos en la sección 1+850, utilizando para esto el programa de cómputo ELF, para dos niveles de embalse 209.23 y 210 m.s.n.m. para este análisis se ha construido una malla de elementos finitos conformada por 585 nudos y 534 elementos. A los nudos de la frontera del modelo se les ha asignado un código (1) y a los nudos en el interior, un código (0). Los nudos de las fronteras se les consideran en las condiciones de frontera. A los nudos en la frontera aguas arriba en exposición con el embalse se les asigna la carga de agua respectiva. El programa realiza la iteración y construye la red de flujo, en donde se puede calcular gráficamente el valor de la presión de poros dentro del cuerpo de la presa

### 5.10.2.2 Parámetros Utilizados

ELF utiliza el valor de la permeabilidad del suelo para modelar el flujo de agua a través de su estructura.

En este análisis se ha asumido valores teóricos de permeabilidad, estos valores están en una proporción de 1 a 10 para materiales del núcleo, fundación y espaldones, además, considera el suelo como isotrópico( $k_x=k_y$ ). Los parámetros utilizados en el cálculo se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 5.5: Parámetro utilizados en el análisis de infiltración**

MATERIAL	PERMEABILIDAD(cm/s)	
	Kx	Ky
1. NUCLEO Y BLANKET	$1 \times 10^{-03}$	$1 \times 10^{-03}$
2. FUNDACION	$1 \times 10^{00}$	$1 \times 10^{00}$
3. FILTRO	$1 \times 10^{-02}$	$1 \times 10^{-02}$
4. ESPALDON	$1 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{-01}$

### 5.10.3 Análisis de Resultados

Del análisis de infiltración mediante el modelamiento matemático se han obtenido como resultados la Red de Flujo, Líneas Equipotenciales, Contornos de Presiones de Poro, Contorno de Gradiente de Velocidades XY, Vectores Velocidad para diferentes niveles de embalse.

Del análisis de infiltración se ha obtenido los valores del caudal infiltrado a través del cuerpo de la presa y su fundación los mismos que se presentan en la Tabla 5.5. En la inspección de dicha tabla se puede notar que la mayor parte del caudal infiltrado es a través de la fundación lo que hace presumir que el núcleo de arcilla cumple satisfactoriamente su función de impermeabilización, pero no se puede decir lo mismo del blanquek.

**Tabla 5.6: Valores de infiltración**

CAUDAL INFILTRADO	NIVEL DE EMBALSE		
	213 msnm	210msnm	209msnm
CUERPO(m3/s/m)	4.25E-06	2.14E-07	2.87E-07
FUNDACION(m3/s/m)	3.08E-05	2.82E-05	2.76E-05
<b>TOTAL(m3/s/m)</b>	<b>3.51E-05</b>	<b>2.84E-05</b>	<b>2.79E-05</b>

Se ha estimado el caudal infiltrado a través de la sección de análisis (1+850) donde se considero una altura de 60 metros y un ancho unitario el cual da un caudal máximo de  $3.50 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s/m}$ . si se considera una longitud total de 2382 m el caudal de infiltración resultante seria aproximadamente de 6955.20 m3/día. También cabe mencionar que de la auscultación de de la instrumentación instalada en la presa (vertedero de aforos) se ha medido el caudal de infiltración en el canal colector al pie de la presa. Dicho caudal es de 15 litros/minuto ( $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$ ) el cual es mayor al estimado en el modelo matemático y nos hace presumir alguna anomalía en el funcionamiento de la estructura. Sin embargo el flujo de infiltrado no presenta sedimentos.

Por otro lado se ha estimado el gradiente hidráulico (formula de Darcy) para un nivel de embalse de 212 msnm el cual resulto  $i=0.3125$  a partir del cual se estimaría la fuerza de filtración.

Los resultados del análisis de infiltración utilizando el programa de computo ELF se presentan en la Lámina 5.17B y 5.17C y los resultados del análisis con el programa de cómputo SEEP/W se presentan en las Láminas 5-18 al 5-21.

### **5.11 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS CON LA LECTURA DE LOS PIEZÓMETROS**

El análisis de flujo se ha realizado en la sección 1+850 de la Presa principal Tinajones, para dos niveles de embalse, en fechas distintas con la finalidad de comparar los resultados teóricos obtenidos, de la cualificación gráfica en base a este análisis y los valores registrados en los piezómetros eléctricos.

Los resultados de este análisis se presentan en las Láminas 5-17B y 5-17C, donde se observa la respuesta que tienen los piezómetros ubicados en la parte aguas arriba del núcleo, con la variación del nivel de embalse. En estas láminas se pueden ver el mal funcionamiento de algunos piezómetros que presentan valores de presiones muy altos con respecto a los teóricos.

Se puede notar que los resultados obtenidos mediante el análisis de infiltración son similares a los obtenidos mediante la auscultación con los piezómetros eléctricos.

Así mismo el caudal estimado en el análisis de infiltración es del mismo orden de magnitud con el valor determinado del aforo en el vertedero ubicado en el pie aguas debajo de la presa.



## CAPITULO 6

### INFLUENCIA DE LA INFILTRACION EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA PRESA TINAJONES

#### 6.1 INTRODUCCION

Si el suelo se encuentra húmedo, existe dentro del suelo resistencias aparentes, debido a las presiones de poro negativas, que pueden producir un talud estable, pero si se produce saturación por infiltración estas desaparecen, produciendo la falla por la disminución de las fuerzas resistentes. En zonas secas las presiones negativas asociadas con la humedad alcanzan valores importantes y determinantes en la estabilidad de los taludes. En el caso de la Presa Tinajones se observa la relación existente entre el periodo de máximas precipitaciones y la aparición de los deslizamientos en el talud aguas arriba del dique principal.

#### 6.2 ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE MATERIAL SUELTO

El equilibrio conjunto de una presa frente al deslizamiento es analizado en este capítulo, cómo no hay un procedimiento de cálculo para determinar de antemano taludes y dimensiones de una presa de material suelto, por lo cual ha de ser predimensionada mediante reglas aproximadas en base a datos recopilados de estructuras similares que han tenido un comportamiento adecuado. Los métodos de cálculo que se presentarán en este capítulo son métodos de comprobación de una sección dada. El parámetro de control que determina el grado de seguridad de los taludes frente a un deslizamiento es el factor de seguridad. Luego de realizar una comprobación mediante la utilización de un determinado método de cálculo y los resultados son amplios y satisfactorios, cabe la posibilidad de reducir los taludes y comprobarlos nuevamente.

##### 6.2.1 Consideraciones Básicas para el Diseño

El planteamiento del tipo de presa y su predimensionamiento es muy distinto a las de concreto ya que ésta última es de un material fabricado de propiedades

uniformes y predecibles y el cimiento ha de ser roca muy consistente, en cambio las de material suelto los componentes pueden ser muy variados (de arcillas a escolleras), aun con determinado material genérico las propiedades varían entre límites muy amplios; en cuanto al cimiento puede ser desde arcillas o gravas hasta roca muy consistente. Por ello el tipo y las dimensiones para este tipo de presas son muy extensos, no hay una sección tipo prefijado, sino que los materiales disponibles y el suelo de fundación son determinantes en la elección del tipo y dimensiones de la presa.

A continuación se presentan las consideraciones que se tienen que tomar en cuenta para el diseño de una presa de material suelto:

#### **6.2.1.1 Propiedades de los Materiales**

La estabilidad de un dique debe de ser evaluado para las condiciones de construcción y operación utilizando propiedades ingenieriles de los materiales de la fundación y del terraplén, también se debe considerar una información geológica adecuada. Cuando se determinen y seleccionen las propiedades ingenieriles de los materiales seleccionados para la construcción del dique, se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

- Posible variación en los materiales de préstamo
- Contenido de agua natural de los materiales de préstamo
- Variación en las proporción de los materiales y el método de colocación
- Condiciones climáticas
- La inevitable variación en el contenido de agua y la densidad compactada, que puede ser superada con un control adecuado en la etapa de construcción.
- La disminución del ángulo de fricción del terraplén granular y de los materiales de la fundación bajo esfuerzos de confinamiento altos, deben ser considerados en el diseño de diques altos.

### 6.2.1.2 Otros Factores

Además de las propiedades de los materiales, existen otros factores que deben ser considerados para establecer los valores de diseño, y que solo pueden ser evaluados a través del ejercicio de la ingeniería son.

- Los efectos de asentimientos diferenciales del terraplén que son localizados en fundaciones compresibles, valles estrechos y profundos.
- Compatibilidad con las características de esfuerzos con el terraplén y del terraplén con la fundación

### 6.2.1.3 Información Geológica

A continuación se presenta la información geológica a considerar.

- Agua subterránea y condiciones de infiltración
- Litología, estratigrafía y detalles geológicos descubiertos por perforaciones e interpretación geológica.
- Máxima sobrecarga en el pasado del lugar, que puede ser deducida de las evidencias geológicas.
- Estructura incluyendo material de cobertura
- Alteraciones del material por contaminación
- Juntas y sistemas de juntas
- Evidencias en campo con relación a deslizamientos, actividad sísmica, movimiento a través de fallas existentes y juntas de tensión.

### 6.2.1.4 Resultados del Análisis de Estabilidad de Taludes

Los resultados del análisis de estabilidad comparados con los resultados de las secciones de ensayo durante el diseño y la evaluación de los cambios de las propiedades de los materiales de la fundación durante y después de la construcción los valores del análisis de estabilidad, dependen de la validez de los esfuerzos de corte asumidos en el diseño y los resultados se revisan

por compatibilidad con los resultados para estructuras similares cuya construcción y operación son conocidas.

El procedimiento de diseño descrito anteriormente utiliza esfuerzos efectivos donde la presión de poros puede ser predicha satisfactoriamente y esfuerzos totales para todo los demás casos en general los esfuerzos efectivos son usados para evaluar.

- Condiciones de embalse parcial e infiltración constante.
- Estabilidad durante y después de la construcción donde las observaciones a los piezómetros son posibles
- La estabilidad de presas donde la fundación y el terraplén que han sido consolidados completamente y no existe presión de poros. Los esfuerzos totales usados como parámetro de diseño de la etapa de construcción, en general para análisis del desembalse rápido y condiciones de exposición a sismos.

## **6.2.2 Condiciones de Comportamiento Inadecuado**

### **6.2.2.1 Falla por Corte**

La falla en una porción del terraplén o en el terraplén y la fundación, debido al movimiento por deslizamiento o rotación relativa de la masa es designada como falla por corte. Una falla por corte es representada convencionalmente como si ocurriera a lo largo de la superficie y es considerada en el análisis de estabilidad. Aunque el corte puede ocurrir en una zona de espesor considerable. La superficie de falla para terraplenes relativamente homogéneos con suelo de fundación de buena consistencia y depósitos de grano fino pueden ser representadas por un arco circular.

### **6.2.2.2 Deformación Excesiva**

Algunos suelos cohesivos, especialmente aquellos compactados con su óptimo contenido de humedad, requieren esfuerzos relativamente grandes para desarrollar

niveles de resistencia al corte. Incluso cuando han sido compactado con un contenido de humedad ligeramente menor que el óptimo y para densidades ligeramente diferentes a los máximos estándar, como consecuencia estos suelos, son colocados en terraplenes que pueden deformarse excesivamente y crear altas presiones de poro. Durante los estudios para el diseño debe ponerse especial atención a la forma de las curvas de esfuerzo deformación de los suelos que van a ser usados en el terraplén.

### **6.2.2.3 Licuefacción**

El fenómeno de licuefacción de suelos suelto, arenas saturadas, arenas sensibles, arcillas, puede ocurrir también en suelos sujetos a deformación por corte o sismos. La posibilidad de licuefacción puede ser evaluada por conocimientos empíricos, complementados por ensayos de laboratorio y criterios ingenieriles. Las arenas que tienen una densidad relativa igual o mayor a 70% se piensa que no son susceptibles a licuefacción. Sin embargo los materiales cohesivos en diques llenos y zonas drenadas a una densidad relativa promedio de 85% es requerido para minimizar el asentamiento del terraplén o el peligro de tubificación y para proporcionar un adecuado esfuerzo de corte.

### **6.2.3 Problemas Especiales**

Las condiciones de falla potencial requieren usualmente una investigación más exhaustiva de la estabilidad, estos problemas se presentan a continuación.

#### **6.2.3.1 Falla Progresiva**

Entre las causas de la presencia de una falla progresiva en un talud de material suelto tenemos:

- La distribución no uniforme de esfuerzos en zonas de falla potencial, esfuerzos relativamente grandes son desarrollados en grandes áreas y esfuerzos máximos en algunos tramos. La máxima resistencia al corte será alcanzada si el esfuerzo máximo es desarrollado a lo largo de la

superficie de falla, donde la curva de esfuerzo deformación para un suelo cae significativamente. Para ciertos suelos es necesario utilizar el esfuerzo de corte ultimo.

- En lugares donde la presa es construida sobre un suelo de fundación de consistencia frágil, alta plasticidad, arcillas sobre consolidadas, que presentan la curva de esfuerzo deformación relativamente diferente, deben considerarse dos factores: (1) utilizar en el diseño factores de seguridad mínimos establecidos por la USCOLD, (2) utilizar el esfuerzo de corte ultimo del suelo de fundación.

### **6.3 CONDICIONES DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD**

La estabilidad de un talud debe evaluarse para las diferentes etapas de servicio u operación de la estructura. Se utilizan propiedades de los materiales que se esperan in-situ, tanto del terraplén como de la cimentación, actualmente se realiza el análisis de estabilidad para las condiciones estática y dinámica.

#### **6.3.1 Análisis de Estabilidad Estática**

Este análisis se refiere a la estabilidad del terraplén y la fundación sin considerar la acción sísmica. Los resultados de los análisis se presentan en términos de factor de seguridad utilizando la metodología del equilibrio límite. Estos análisis se pueden realizar tanto en esfuerzos efectivos como esfuerzos totales.

Cundo se utiliza el método del equilibrio limite, se asume que los parámetros de resistencia son independientes del comportamiento esfuerzo deformación de los suelos, por lo tanto no se tiene información del valor de los desplazamientos.

El análisis de estabilidad estática se realiza tanto para la condición de estabilidad a corto plazo y largo plazo.

#### **6.3.2 Análisis de Estabilidad Dinámica**

El análisis se refiere a la capacidad de un terraplén de soportar cargas sísmicas, mantener su integridad durante y después de un evento sísmico. Un análisis de estabilidad dinámico se realiza bajo la siguiente secuencia.

- Determinar el estado inicial de esfuerzos en el terraplén y la cimentación antes del sismo.
- Selección del sismo de diseño y los parámetros de excitación de la roca basal.
- Establecimiento de los módulos dinámicos y factores de amortiguamiento de los materiales.
- Determinación de los esfuerzos dinámicos inducidos, así como las deformaciones generadas a causa de la acción sísmica.
- Estimación del movimiento lateral dinámicamente inducido.

El análisis dinámico es un cálculo un tanto sofisticado por lo tanto en la práctica general se realiza un método simplificado denominado el análisis pseudo estático.

#### **6.3.2.1 Análisis de Estabilidad Pseudo Estático**

El método consiste en calcular el factor de seguridad contra deslizamiento, cuando una fuerza horizontal es igual al producto del coeficiente sísmico por el peso de la masa potencial de falla, la cual es adicionada a las fuerzas estáticas ya existentes. En presas bajas en áreas alejadas, se utiliza los métodos pseudo estáticos con un coeficiente sísmico horizontal seleccionado sobre la base de la sismicidad de la zona.

### **6.4 ESTABILIDAD EN PRESAS Y TERRAPLENES**

La figura que se muestra a continuación nos muestra la variación de los esfuerzos tangenciales, presiones intersticiales y el factor de seguridad en una presa de tierra, partiendo de la etapa de construcción y continuando a través de la vida de servicio del embalse. Durante la construcción aumentan los esfuerzos tangenciales sobre la superficie de deslizamiento potencial. También aumentan las presiones intersticiales ya que el suelo colocado va siendo cargado al superponerle capas sucesivas. Después de terminar la obra las sobrepresiones intersticiales comienzan a disiparse, volviendo a aumentar de nuevo en el

llenado de la presa. El llenado del embalse hace disminuir los esfuerzos tangenciales en el talud de aguas arriba, debido al efecto favorable de la presión del agua sobre el talud, mientras que los esfuerzos tangenciales medios en el talud aguas abajo permanecen constantes o aumentan ligeramente. El talud aguas abajo puede estar sometido varias veces a un esfuerzo de corte adicional durante el funcionamiento del embalse como resultado de un vaciado rápido. La conclusión que se saca de esto es que el instante crítico para el talud aguas arriba es al final de la construcción y en un proceso de desembalse rápido, mientras que en que en el talud aguas arriba el instante crítico es al final de la construcción y en un estado de infiltración constante.

La estructura de la presa y su fundación están sujetos a esfuerzos de corte impuestos por el peso del cuerpo de la presa, por el embalse, infiltración y fuerzas debidas a sismos eventuales. Los casos a considerar para el análisis de estabilidad son:

#### 6.4.1 Estado Final de la Construcción

En un terraplén cuya estructura está compuesta total o parcialmente de materiales impermeables que fueron colocados con un contenido de humedad igual al que tiene una muestra al final del ensayo de consolidación. La presión de poros será incluida porque el suelo no llegará a consolidarse completamente durante el periodo de construcción.

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes en el estado al final de la construcción se puede realizar el cálculo en esfuerzos totales ( $S_u$ ) o en esfuerzos efectivos ( $\bar{c}, \bar{\phi}$ ). Para el cálculo de la estabilidad por el método de esfuerzos totales es necesario estimar la resistencia al corte al final de la construcción, considerando los factores que influyen sobre la resistencia al corte sin drenaje de un suelo parcialmente saturado como la disipación de presiones intersticiales que pueden producirse durante la construcción. Para el cálculo por el método de esfuerzos efectivos ( $\bar{c}, \bar{\phi}$ ) Es necesario estimar las presiones intersticiales producidas en la presa durante la construcción.



Desde el punto de vista de la exactitud no existe diferencia básica entre los dos métodos, pero existe una clara ventaja con el método de presiones efectivas por que las presiones intersticiales pueden ser medidas in situ. La inestabilidad al final de la construcción resulta más probable cuando el suelo es compactado con una humedad por encima de la óptima; es decir cuando el grado de saturación inicial es relativamente alto. Desde el punto de vista de la seguridad es necesario compactar con un contenido de humedad menor a la óptima, pero eso no es recomendable desde el punto de vista económico, ni para la prevención de fisuras.

#### **6.4.2 Estabilidad de los Taludes en un Estado de Infiltración Constante**

El cálculo de la estabilidad en el talud aguas abajo de una presa de material suelto se realiza con el método de esfuerzos efectivos  $(\bar{c}, \bar{\phi})$ , estimando las presiones intersticiales a partir de la red de flujo. Para reducir los riesgos de inestabilidad en el talud aguas abajo por causa de un flujo establecido, se propone el empleo de un suelo permeable en el manto de aguas abajo o la construcción de filtros para drenar la corriente de filtración, de manera que la línea freática en el talud de aguas abajo permanezca baja. Si se permitiera el brote de la filtración en el talud aguas abajo, se produciría una inestabilidad local en dicho punto, originándose una erosión gradual y la socavación de la presa, a este tipo de falla se le denomina tubificación, ha sido una causa frecuente de fallas de muchas presas.

#### **6.4.3 Desembalse Rápido**

Si se mantiene un nivel alto en el embalse durante un periodo prolongado se puede llegar a saturar por infiltración, si luego se procede con un descenso rápido del nivel de agua, se genera un exceso de presión de poros y un desequilibrio de las fuerzas de filtración. En general en estos casos para tener un análisis conservador debemos tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La disipación del exceso de presión de poro el cual no ocurre durante el proceso de desembalse rápido.

- La superficie de agua es bajada instantáneamente desde un nivel alto al nivel mínimo. Para terraplenes compuestos de materiales impermeables la fuerza de resistencia a la fricción puede ser determinada, utilizando pesos específicos saturados para los materiales que están por encima de la línea de infiltración y pesos sumergidos para la parte del material que está por debajo de la línea de infiltración.

El vaciado rápido da a lugar al descenso repentino del nivel de agua en contacto con el talud. Los taludes aguas arriba de las presas de tierra, al igual que los taludes naturales adyacentes a un embalse, sufren este fenómeno, cuando se hace descender repentinamente el nivel del embalse. El vaciado rápido también se produce al descender el nivel de un río después de una crecida o cuando el nivel del mar baja como continuación de una marea tormentosa. Aunque las presiones intersticiales en un talud se pueden ajustar inmediatamente al nivel del agua descendente, pueden producirse presiones intersticiales elevadas como consecuencia de un vaciado rápido.

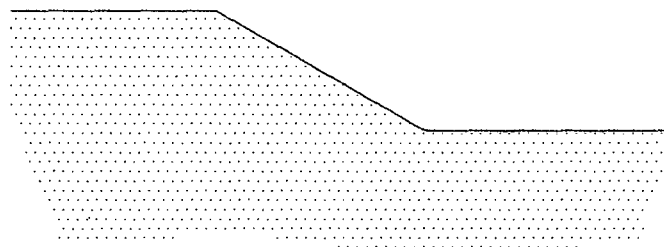
Las consecuencias de un vaciado rápido pueden dividirse en dos fases. Si el tiempo de vaciado es muy inferior al tiempo en el que pueden producirse ajustes de consolidación en el talud, las presiones intersticiales inmediatamente después del vaciado serán iguales a las presiones intersticiales antes del vaciado más la variación de presión intersticial debido a la variación de la carga de agua sobre el talud. Con el tiempo se producirán ajustes de consolidación pero las presiones intersticiales aún permanecerán altas hasta que el agua en exceso sea drenada del talud y se alcance un nuevo equilibrio correspondiente al nuevo nivel de agua. En suelos permeables como arenas gruesas y gravas el tiempo de consolidación será generalmente menor que cualquier tiempo de vaciado real, en este tipo de taludes se debe realizar el cálculo de estabilidad con las presiones intersticiales obtenidas de redes de flujo en régimen de transición.

### 6.4.3.1 El Tiempo de Consolidación Mucho Mayor que el Tiempo de Vaciado

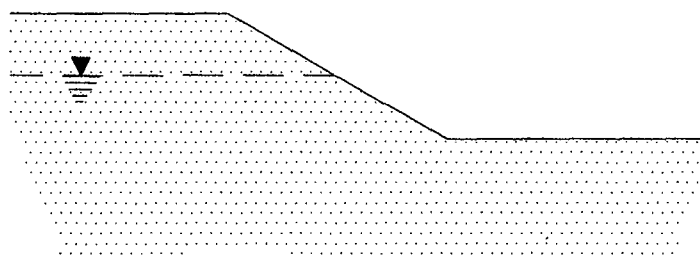
En este caso se puede estudiar la estabilidad por el método de  $S_u$  o el método de  $(\bar{c}, \bar{\phi})$ . Para el método de  $(\bar{c}, \bar{\phi})$  es necesario calcular la variación de las presiones intersticiales producidas por la variación de la carga de agua, Bishop (1954) ha deducido ecuaciones para realizar dicho cálculo, para lo cual se considera al suelo en estado saturado. Para el método  $S_u$  es necesario determinar la resistencia al corte sin drenaje. Lowe y Karafiath (1960) han expuesto al detalle el método para realizar los cálculos de estabilidad por este método.

### 6.4.3.2 Tiempo de Consolidación Mucho Menor que el Tiempo de Vaciado

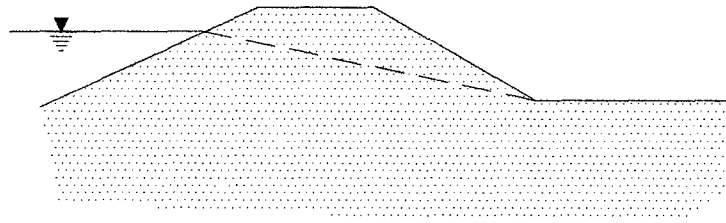
La estabilidad de los taludes en este caso se estudia por el método de  $(\bar{c}, \bar{\phi})$  determinando las presiones intersticiales mediante la red de flujo (Renius, 1955). Estas redes representan las condiciones de flujo y de presiones intersticiales en un instante determinado. El estado crítico viene a ser generalmente el que se realiza inmediatamente después del vaciado.



(a) Talud seco

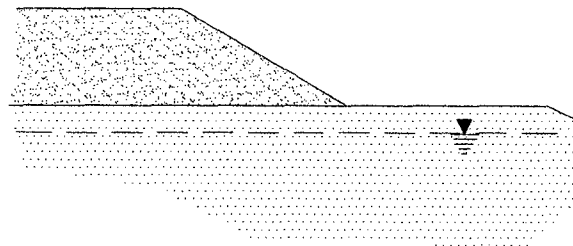


(b) Talud parcialmente sumergido

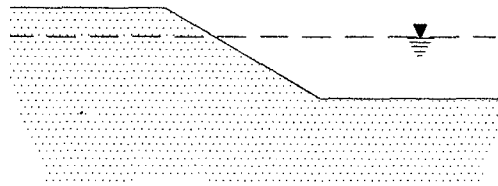


(c) Estado de infiltración constante

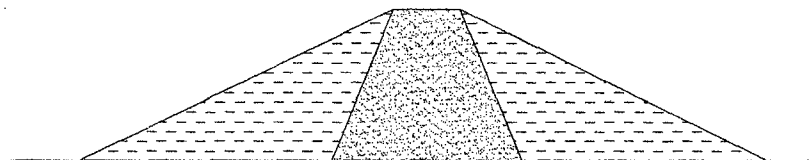
**Figura 6.1: Problemas de estabilidad a largo plazo**



(a) Relleno sobre arcilla blanda

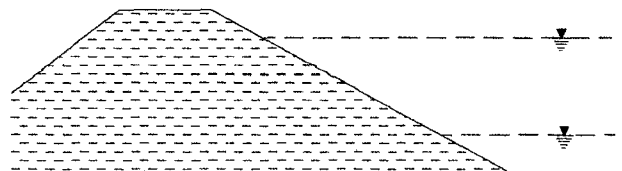


(b) Corte en arcilla blanda

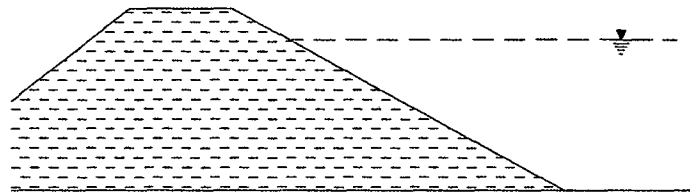


(c) Núcleo de arcilla en presa

**Figura 6.2: Problemas de estabilidad al final de la construcción**



(a) Desembalse rápido



(b) Estabilidad durante y después del sismo

**Figura 6.3: Problemas de estabilidad a corto plazo**

## 6.5 METODOS DE ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

### 6.5.1 Breve Resumen Histórico y Tendencias Actuales

Hasta la tercera decena del siglo las presas de materiales sueltos se dimensionaban empíricamente, según las reglas prácticas sobre taludes, algunas de ellas, bastante discutibles, según ha demostrado la experiencia. En 1815, *Fellenius*, al analizar las causas de la ruina del muelle de Goteborg (Suecia), ideó un método general de comprobación de taludes, que ha sido el punto de partida de los métodos usados hasta la aparición del de elementos finitos.

La base del método es suponer una superficie deslizante circular en la que actúan como fuerzas resistentes la cohesión y el rozamiento, y de ahí, y la nacionalidad de su autor, el apelativo de <<método del círculo sueco>> con que se le conoce. Aunque su aplicación original fue a taludes naturales o artificiales de tierras, pronto se aplicó a las presas, y fue el primer método racional para su cálculo, y durante cierto tiempo el único.

En este método, la masa presuntamente deslizante se divide en franjas o rebanadas verticales, trapeciales o triangulares y se hace caso omiso de las fuerzas entre cada dos rebanadas adyacentes; es decir que, aunque formada por franjas, se considera la masa deslizante como un conjunto sólido.

Bastante más tarde, Taylor propuso una mejora para tener en cuenta la interacción entre rebanadas, sobre la base simplificadora de que esas fuerzas son todas paralelas a la cuerda del arco deslizante.

Surgieron después otros métodos con hipótesis más amplias respecto a esas fuerzas. *Bishop* supone una superficie deslizante circular y una cierta ley de las fuerzas en las superficies verticales entre rebanadas. *Janbu* llega más allá y determina esas fuerzas con toda generalidad, sin condicionantes apriorísticas, por un procedimiento iterativo.

Los métodos más utilizados y por tanto, más contrastados en cuanto a la validez de los valores que proporcionan y su adecuación a los valores exigidos por la Instrucción son los de *Bishop* (1954) para superficies de rotura circulares (especialmente indicadas para materiales cohesivos) y *Janbu* (1957) para superficies de forma cualquiera que se aproximan mediante poligonales (especialmente indicados para escolleras). Todos estos métodos trabajan con secciones transversales del talud y son, por tanto, bidimensionales.

La necesidad de introducir hipótesis adicionales para poder resolver las ecuaciones de equilibrio subyacentes en los métodos clásicos ha molestado siempre al ingeniero, siendo muy numerosos desde los años sesenta los intentos de desarrollar formulaciones o métodos alternativos.

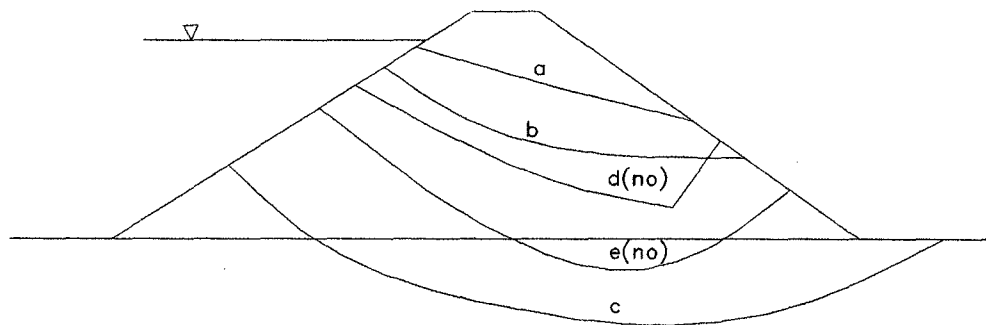
Dentro de esta misma idea *Yaniagami y Ueta* (1988) abordan el problema mediante programación dinámica, aplicando el principio de optimalidad de *Bellman* para obtener la superficie de deslizamiento crítica.

También ha habido intentos de trabajar con métodos probabilísticos, pudiendo citarse los de *Greco* (1987), que empleaba el concepto del camino aleatorio.

La extensión de los métodos clásicos a situaciones tridimensionales, comenzada por *Anagnosti* (1969), ha sido continuada por *Ugai* (1988), que ha tenido realizaciones generalizando los métodos de *Fellenius*, *Bishop* y *Janbu*. Es interesante destacar que de las experiencias publicadas por este autor se deduce que la relación  $F_3/F_2$  (coeficientes de seguridad obtenidos por los métodos tridimensionales y bidimensionales) varía de forma casi lineal y creciente con el coeficiente sísmico, manteniéndose prácticamente siempre por encima de la unidad.

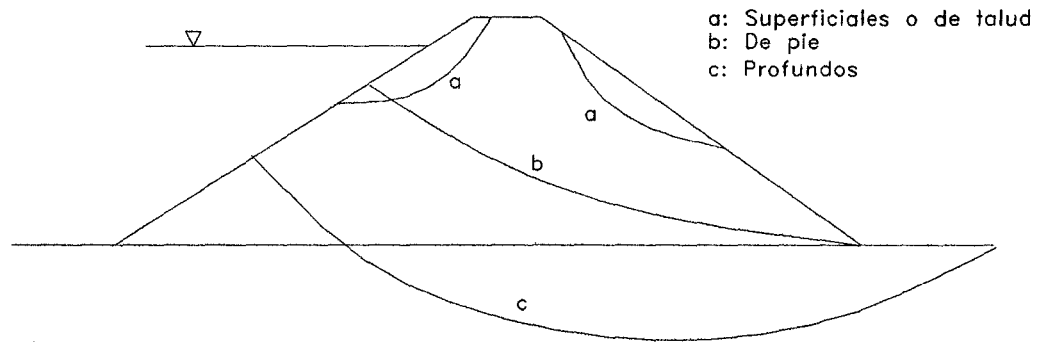
### 6.5.2 Elección de la Superficie de Deslizamiento

Como se dijo las primeras aplicaciones de los métodos de rebanadas utilizaban superficies circulares, pero más tarde se extendieron a otras. La única condición que debe cumplir una superficie deslizante es que sea viable como tal, es decir que su geometría haga posible el deslizamiento. Es viable la circunferencia (curvatura constante) y cualquier idea de curvatura variable, con tal que ésta sea decreciente (radios crecientes) en el sentido del deslizamiento. para que la masa pueda moverse sin obstáculos (Figura 6.4). Por ello, son viables las superficies (a),(b), (c) y no lo son las (d), (e).



**Figura 6.4: Condiciones para la ocurrencia de un deslizamiento**

Los deslizamientos pueden ser de tres tipos como se observa en la Figura 6.5; superficiales o de talud (a), de pie (b) o profundos (c). En general, los dos últimos suelen ser los más peligrosos. El primero puede serlo si al debilitar la sección provoca otro de mayor profundidad. En general, se da más bien en la forma (a') (hacia agua arriba) en el caso de un desembalse rápido.



**Figura 6.5: Tipos de superficie de deslizamiento**

Todos estos procedimientos de cálculo se basan en dividir la superficie deslizante en rebanadas verticales, y exigen tantear varias superficies hasta obtener la que da el mínimo coeficiente de seguridad, que es el de la presa. Las superficies; fueron primero círculos (Fellenius), pero luego se utilizaron otras de curvatura variable (la espiral logarítmica, por ejemplo) o mixtas de rectas y curvas. La metodología es la misma para todas las curvas deslizantes, pues esta basada en la división en franjas verticales, que pueden ser de cualquier ancho y se adaptan a todas las formas. Solo el de *Bishop* presupone un círculo, a cambio de precisar algo más que el de Taylor las fuerzas interfranjas.

Los métodos que toman en cuenta estas fuerzas tienen mayor precisión que el original sueco pero este tiene la ventaja de su sencillez, y suele dar resultados del lado de la seguridad del lado de la seguridad, por lo que es muy útil en presas de altura moderada, y en cualquier caso para tanteos de predimensionamiento. Aunque todos los métodos son sencillos de cálculo salvo el de Janbu, que es el más complicado y aproximado, la necesidad de repetirlos para varias superficies deslizantes los hace penosos.

En todo lo que sigue se supone un estado bidimensional, que suele ser suficiente en la mayoría de los casos, y después se harán unas consideraciones sobre aquellos en los que realmente se da el efecto tridimensional.



Las presiones intersticiales, que juegan un papel decisivo en la estabilidad, se obtienen de la red de filtración, que debe obtenerse previamente. Cuando se trata de comprobar una presa construida se utilizan los datos de los piezómetros.

Para abreviar los tanteos, deben elegirse las superficies de forma que corten los materiales mas débiles: el núcleo, en principio, y la cimentación, eventualmente, sobre todo si presenta capas arcillosas intercaladas. La observación de los accidentes ocurridos aconseja estas normas, y la práctica personal facilita mucho la elección más directa de las superficies más desfavorables. Y los mismos resultados de cada tanteo van aconsejando los pasos siguientes.

En las presas de escollera o con espaldones de gravas (materiales incoherentes) pueden tantearse superficies planas o mixtas (cuñas): curvas o planas en el núcleo y rectas en el espaldón o una, dos o tres superficies planas. Lo más normal es suponer dos planos o una curva y un plano.

En general, las curvas deslizantes no deben cortar obras de hormigón, como rastrillos, pantallas etc., ya que su cohesión las hace más resistentes.

### **6.5.3 Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes**

A continuación se presenta un resumen de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes y se indican las consideraciones mas importantes(ver Tablas 6.1 y 6.2)

Tabla 6.1: Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes

Método	Superficie de falla	Equilibrio	Característica
Fellini (1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas y no satisface el equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada y las dovelas individuales. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros (Factores de seguridad bajos).
Bishop simplificado (1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas cortantes entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas, la solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú simplificado (1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que la fuerza cortante entre dovelas es cero. La solución es sobredeterminada porque no satisface completamente las condiciones de momentos, sin embargo Janbú utiliza un factor de seguridad $F_0$ para corregir (Factores de seguridad bajos).
Sueco Modificado, U.S Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Asume que las fuerzas actuantes entre partículas están inclinadas a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos <sup>3</sup> . Se considera como el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Satisfacen rigurosamente el equilibrio estático, asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tienen una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al de Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante se asume que varía según una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que la magnitud de las fuerzas verticales sigue un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para determinar el coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad.
Elementos finitos	Cualquier forma de superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtiene esfuerzos y deformaciones en los nudos de los elementos pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmica	Espiral Logarítmica	Momentos y fuerzas	Existen diferentes métodos para diversas condiciones de equilibrio.

Tabla 6.2 Alcances de los Métodos de Análisis

Autor	Parámetros	Inclinación del talud	Método	Observaciones
Taylor(1948)	Cu C, $\phi$	0-90° 0-90°	$\phi=0$ Circulo de fricción	Análisis no drenado Taludes secos solamente
Bishop y Morgenstern(1960)	C, $\phi$ , ru	11-26.5°	Bishop	Primeros en incluir los efectos del agua.
Gibson y Morgenstern(1960)	Cu	0-90°	$\phi=0$	Análisis no drenado con resistencia nula en la superficie y Cu aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer(1967)	C, $\phi$ , ru	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente
Janbu (1968)	Cu C, $\phi$ , ru	0-90°	$\phi=0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos del movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster(1968)	Cu	0-90°	$\phi=0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en al superficie y Cu aumenta linealmente con las profundidad
Chen y Giger(1971)	C, $\phi$	20-90°	Análisis limite	
O' Connor Mitchell(1977)	C, $\phi$ , ru	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern, extendido para incluir $N_c=0.1$
Hoek y Bray(1977)	C, $\phi$	0-90°	Circulo de fricción	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
	C, $\phi$ ,	0-90°	Cuña	
Cousins(1978)	C, $\phi$	0-45°	Circulo de fricción	Extensión del método de Taylor
Charles y Soares(1984)	$\phi$	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr -Coulomb
Barnes(1991)	C, $\phi$ , ru	11-63°	Bishop	Extensión del método de Bishop y Morgenstern para un mayor rango de ángulos.

#### 6.5.4 Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Equilibrio Limite

Cuando se utiliza algunos de los métodos de estabilidad de taludes de equilibrio límite es necesario conocer las suposiciones que se hacen, así como del cumplimiento de las condiciones de equilibrio, la elección de una superficie de falla correcta, especificación de los parámetros de los materiales y las presiones de poro.

#### **6.5.4.1 Elección del Mecanismo de Falla**

Los taludes fallan sobre superficies aproximadamente circulares, por ello esta superficie siempre se analiza. Sin embargo hay muchos caso en que la superficie no es circular. A continuación se presentan los principales motivos por el cual un superficie no circular es mas critica.

- Cuando en la cimentación existe una capa no débil, la cual puede ser una arcilla blanda o una arena licuable.
- Cuando en la cimentación existe una arcilla sobreconsolidada, fisurada, ya que estos materiales presentan una resistencia altamente anisotrópica. La resistencia a través de las fisuras puede ser hasta el 20 por ciento, comparado con otras direcciones (Wright y Duncan).
- Cuando el núcleo de una presa es inclinado y es significativamente mas débil que el espaldón.

### **6.6 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PRESA PRINCIPAL TINAJONES.**

Después de la ocurrencia del fenómeno El Niño excepcional de 1998 con el cual se volvieron a presentar agrietamientos y deslizamientos en la corona del dique principal de la presa Tinajones, por lo cual se llegó a la conclusión de la relación que existía entre los deslizamientos y la infiltración del agua proveniente de las lluvias del evento El Niño. Tomando en consideración esta hipótesis se realizó un análisis de estabilidad de taludes para las condiciones propuestas.

#### **6.6.1 Análisis de Estabilidad a Largo Plazo**

El caso de la estabilidad largo plazo es el caso mas simple donde se considera un terraplén seco, se debe de utilizar los parámetros de resistencia en esfuerzo efectivos  $c$  y  $\phi$  determinados de ensayos de laboratorio consolidados drenados o ensayos de consolidación sin drenaje con la medición de la presión de poros.

Dentro de este caso se analizan las siguientes condiciones:

- El problema más simple es el caso de un terraplén seco, deben de utilizarse los parámetros de resistencia en esfuerzos efectivos determinados en ensayos consolidados- drenados (CD), las presiones de poro son nulas.
- Caso de un talud parcialmente sumergido, deben de utilizarse parámetros de resistencia efectivos determinados en ensayos consolidados drenados(CD), o ensayos consolidados no drenados con la medición de la presión de poros(CSD) este problema puede resolverse de dos maneras: Primero utilizando pesos unitarios saturados, considerando la presión del embalse en la cara del talud y especificando la presión de poros en la superficie de falla y segundo utilizando pesos unitarios sumergidos debajo del nivel del embalse y omitiendo la presión de poros. Además para realizar el análisis pseudo estático utilizar el primer método.
- El caso de un talud sometido a un estado de infiltración constante representa la condición más crítica para el talud aguas abajo de una presa con embalse máximo. Se utilizan parámetros de resistencia efectivos determinados en ensayos consolidados drenados (CD) y (CSD) y la presión de poros se determina de la red de flujo.

Para el análisis de estabilidad de taludes en la presa principal Tinajones, se ha realizado el modelamiento de la condición a largo plazo con el nivel de embalse variando entre 200 y 210 m.s.n.m.

#### **6.6.1.1 Parámetros de los Materiales**

Las propiedades de los materiales utilizados en este análisis se presentan en la Tabla N° 6.3, además la cohesión ha sido considerada como nula para todos los materiales.

**Tabla N° 6.3 Parámetros de los Materiales (Largo Plazo)**

MATERIALES DE LA PRESA	PESO UNITARIO (KN/m <sup>3</sup> )	ANGULO DE FRICCION(°)
1. Espaldón – Apoyo con Finos	18	30
2. Espaldón – Apoyo	19	35
3. Espaldón – Material de Quebrada	20	35
4. Espaldón-Enrocado	21	42
5. Fundación	19.5	35
6. Núcleo	18	30
7. Filtro	18	30
8. Blanket	18	30

#### 6.6.1.2 Análisis de Resultados

Los resultados de este análisis expresados en términos de factor de seguridad se presentan en la Tabla N° 6.5, los cuales indican para el caso del largo plazo un comportamiento adecuado de la estructura, evidenciándose ésto, porque los factores de seguridad son superiores a 2.0 en todos los casos, siendo este valor mayor que el mínimo exigido por las normas para el diseño de presas (USCOLD).

#### 6.6.2 Análisis de Estabilidad a Corto Plazo

El análisis de estabilidad corto plazo contempla las siguientes condiciones de análisis.

- Caso de un terraplén construido sobre una cimentación de arcilla blanda, este problema se analiza normalmente en esfuerzos totales y resistencia al corte sin drenaje, utilizando el método de  $\phi=0$ . La resistencia al corte sin drenaje se expresa términos del esfuerzo vertical efectivo in-situ y la relación de sobreconsolidación(Ladd yFoot,1974).

- Caso de un talud por corte en arcillas saturadas, se analiza con el método  $\phi=0$ .
- Caso de un terraplén construido rápidamente sobre una cimentación rígida, este problema se resuelve utilizando parámetros de esfuerzos totales.
- Caso de un talud en condición de desembalse rápido, este caso puede analizarse tanto con esfuerzos totales y esfuerzos efectivos. El método mas usado para resolver este problema es el método planteado por Lowe y Karafiath(1960), dicho procedimiento implica la realización de dos análisis de estabilidad. El primer análisis se realiza en esfuerzos efectivos para la condición de infiltración constante con embalse máximo con el objeto de obtener los esfuerzos normales efectivos y los esfuerzos de corte en la superficie de falla, así como la razón de sobreconsolidación y el segundo análisis de estabilidad para la condición de desembalse utilizando las resistencias sin drenaje( $S_u$ ).
- Caso de un talud con carga sísmica se modela como un análisis pseudo estático, aplicando una fuerza horizontal, los análisis de estabilidad se realizan con pesos específicos totales.
- Caso de un talud post sismo, este caso es un caso especial del análisis a corto plazo, el análisis se realiza sin aplicar un coeficiente sísmico, pero las resistencias no drenadas pueden ser reducidas con el objeto de tomar en cuenta las sobrepresiones de poro que se generan en un movimiento sísmico.

#### **6.6.2.1 Estabilidad Durante el Fenómeno de El Niño**

En base a la evidencia existente, de la relación directa que existe entre los años de precipitaciones máximas, por causa de la presencia del fenómeno el Niño y la aparición de deslizamientos en el talud aguas arriba de la Presa Principal Tinajones, se ha planteado dos hipótesis para realizar el análisis de estabilidad de taludes. Esta relación se puede observar en los registro de los piezómetros donde

se observa los valores altos en las lecturas en los años de máximas precipitaciones, ésto fue presentado en el Capítulo 5.

### 6.6.2.2 Estabilidad a Corto Plazo Caso del Filtro Ocluido

Se ha realizado un análisis de estabilidad de taludes considerando superficies de falla circulares e irregulares(cuñas). En este caso se plantea la posibilidad del filtro ocluido, es decir que esté saturado cuando el nivel de embalse haya alcanzado un nivel superior a la cota máxima del filtro, esta condición considera al filtro con una carga de presión de 215 m y se ha hecho variar la cota del nivel de embalse entre 200 y 210 m.s.n.m. para los demás materiales del cuerpo de la Presa.

En este caso han sido utilizadas las resistencias de corte no drenadas. Los valores de pesos unitarios y el ángulo de fricción de cada uno de los materiales del cuerpo de la presa que han sido utilizados en este análisis de presentan en la Tabla N° 6.4.

**Tabla N° 6.4 Parámetros de los Materiales(Corto Plazo)**

MATERIALES DE LA PRESA	PESO UNITARIO (KN/m3)	ANGULO DE FRICCION(°)
1. Espaldón – Apoyo con Finos	18	30
2. Espaldón – Apoyo	19	35
3. Espaldón – Material de Quebrada	20	17
4. Espaldón-Enrocado	21	42
5. Fundación	19.5	35
6. Núcleo	18	14
7. Filtro	18	30
8. Blanket	18	14



### 6.6.2.3 Estabilidad a Corto Plazo( Llenado de las grietas del núcleo)

En presencia de las aguas de lluvia excesivas causadas por el fenómeno El Niño, las grietas del núcleo son llenadas, se considera al material del núcleo y blanket con cargas de presión total de 215 m, para realizar este análisis se ha hecho variar el nivel de embalse entre 200 y 210 m.s.n.m. las superficies de falla consideradas son circulares y de cuña. Los parámetros de los materiales utilizados se presentan en la Tabla N° 6.4.

### 6.6.2.4 Análisis de Resultados

En la Tabla N° 6.5 se presentan los resultados del análisis de estabilidad, así como el tipo de superficie de deslizamiento utilizado, en el Anexo C se presentan los gráficos de las superficies de falla resultante. Los cálculos de estabilidad se han realizado por los métodos de Bishop modificado para superficies circulares y Spencer para la fallas tipo Cuñas.

Es evidente a partir de la inspección de la Tabla N° 6.5, que la presencia de agua de infiltración dentro del cuerpo de la presa, tiene un efecto muy pronunciado sobre el factor de seguridad. Sin embargo el llenado del filtro presente en el espaldón aguas arriba o el llenado de las grietas en el núcleo, subiendo la carga piezométrica en estos materiales hasta la cota 215 m.s.n.m. induce una disminución muy sensible en el factor de seguridad, hasta valores cerca de 1.0, valor límite de estabilidad con el cual se pueden iniciar desplazamientos irreversibles, tales como se observaron en las lluvias excepcionales que cayeron en 1983 y 1998.

También se han realizado análisis de estabilidad utilizando el programa de computo SLOPE/W para diferentes niveles de embalse para condiciones estáticas y Pseudo estáticas.

El agua del reservorio proporciona cierto apoyo al talud expuesto por lo cual se puede observar que los factores de seguridad disminuyen conforme desciende el nivel de embalse (ver Tabla 6.6).

Además se ha evaluado la condición de desembalse rápido en donde se puede observar que los factores de seguridad obtenidos son inferiores a la unidad lo cual explicaría las grietas detectadas en la corona de la Presa.

Los resultados se presentan las Láminas 6.18 al 6.24

**Tabla N°6.5: Resultados del análisis de estabilidad de taludes-PCSTABL**

Caso	Nivel de Embalse	Factor de Seguridad	
		Falla Circular Bishop	Falla Irregular Spencer
Largo Plazo	200	1.98	
	205	2.05	
	210		2.16
	200		2.61
Fenómeno El Niño Filtro Ocluido	200		1.01
	200		1.78
	200	1.23	
	200		1.78
	205	1.32	
	206	1.0	
Presión en el Blanket			
Fenómeno El Niño Llenado de las Grietas del Núcleo	200		0.8
	205		0.82
	210		1.58
	200		1.23
	205		1.43

**Tabla N°6.6: Resultados del análisis de estabilidad de taludes-SLOPE/W**

Caso	Nivel de Embalse	Factor de Seguridad
Estático	210	1.97
Pseudo Estático	210	1.08
Estático	205	1.86
Pseudo Estático	205	1.09
Estático	200	1.71
Pseudo Estático	200	1.03
Desembalse Rapido	210 a 190	0.08

### 6.7 ESQUEMA DE REHABILITACIÓN PROPUESTO

En base a estos resultados se propone un esquema de rehabilitación de la presa con el fin de prevenir futuros deslizamientos. Primero la eliminación de toda posibilidad de infiltración de aguas de lluvias intensas asociadas con el fenómeno de El Niño, y segundo la reconstrucción del núcleo de arcilla para lograr su impermeabilización y sobre elevación hasta la cota de diseño de 215 m.s.n.m. En base a estos dos criterios se ha propuesto las siguientes tareas.

- Remoción parcial de la corona hasta la cota 210 m.s.n.m. aguas arriba y 212.0 m.s.n.m. hacia aguas abajo.
- Reconstrucción del núcleo y los espaldones hasta la cota 215 m.s.n.m.
- Colocación de un filtro de 1 m. hacia aguas abajo y aguas arriba del núcleo.
- Encapsulado del relleno por una geomembrana de PVC de 1 mm de espesor.
- Colocación de un material de transición (grava arenosa) sobre la geomembrana de un metro de espesor horizontal en los taludes y de 20 cm. en la corona.

- Colocar una base de rodadura de 6 m de ancho y 30 cm. de espesor.
- Colocar una capa de rodadura de 25 mm. y 6 m. de ancho con un bombeo de 2%.

El esquema de rehabilitación se presenta en la Lámina N° 6.25.

## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- El agua intersticial influye sobre el comportamiento del suelo de dos maneras, uno modificando la forma en que las partículas de suelo se asocian para formar el esqueleto mineral (interacción química) y otro influyendo sobre la magnitud de las fuerzas transmitidas a través de dicho esqueleto (interacción física).
- La permeabilidad en una masa de suelo es importante en: la evaluación de la cantidad de filtración a través o por debajo de presas ó diques, evaluación de la subpresión o fuerzas de filtración bajo estructuras hidráulicas para un análisis de estabilidad, control de las velocidades de filtración de tal manera que las partículas de grano fino no sean erosionadas de la masa de suelo y la rapidez de asentamiento en los que el cambio de volumen de suelo ocurre en la medida que el agua es expelida de los poros.
- El flujo de agua infiltrada a través de una presa de materiales sueltos o de su cimientamiento produce los siguientes efectos: uno directo, de pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar o subsanar, se produce un estado de presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso. Además, al estar mojados los materiales, disminuye su cohesión y su resistencia al rozamiento, añadiéndose estos efectos al de las componentes desestabilizadoras de las presiones internas. Finalmente el paso del agua a través de las zonas con materiales finos tiende a arrastrar esas partículas, con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva. Este fenómeno se llama sifonamiento (piping).
- Al realizar un análisis de infiltración se encuentra cierta dificultad al intentar reproducir medios de distinta permeabilidad por cual se hace una simplificación tomando en cuenta permeabilidades relativas y no las absolutas, pues estas influyen en la refracción o ruptura de las línea de corriente.

- El drenaje es, en apariencia, una contradicción con la función impermeabilizadora del núcleo de la propia presa, si es homogénea e impermeable. Pero ya se ha visto que es un complemento necesario para garantizarla con seguridad. El drenaje hace bajar la línea de saturación, la aleja del talud aguas abajo, disminuye el gradiente en esa zona y reduce las presiones intersticiales. Su único defecto es que incrementa la filtración, pero esto es de menor importancia, dado el gran margen de impermeabilidad que tienen los núcleos, y más en las presas homogéneas.
- El método de los elementos finitos es una herramienta muy importante pues nos permite modelar con gran exactitud el fenómeno de la infiltración. Por consiguiente, se debe tener especial cuidado en la generación de la malla de elementos finitos. La exactitud de los resultados también es afectada por la forma y tipo de elementos. Un buen método para generar un equilibrio entre la facilidad y la eficacia de los resultados, es la de tomar especial atención en la generación de la malla.

### **Presa Tinajones**

- Para realizar el modelo matemático de la Presa Tinajones se ha considerado los materiales como isotrópicos, teniendo poca influencia en los análisis la anisotropía.
- La presa Tinajones fue diseñada y construida aproximadamente hace 30 años, en esa época para su diseño no se contaba con las herramientas computacionales que existen en la actualidad, para realizar el modelamiento matemático de su comportamiento frente a fenómenos como la infiltración.
- En el periodo de explotación del reservorio Tinajones, en tres ocasiones durante los años 1972, 1988 y 1998 se presentaron simultáneamente niveles máximos en el reservorio y lluvias de extrema intensidad (140 mm/24 horas), conocidas como el fenómeno de El Niño, donde se produjo el fisuramiento de la corona.
- Se cree que la causa de los fisuramientos se debe al fisuramiento del blanket impermeable y de la parte aguas arriba del núcleo impermeable. Esta conclusión se

encontraría sustentada por las medidas piezométricas muy altas registradas en la parte aguas arriba del núcleo.

- Los asentamientos diferenciales de las partes de la corona de la presa separados por dichas fisuras son de 10 a 15 cm, mientras que los asentamientos máximos totales de los hitos de la corona de la presa en el periodo 1969 a 1999 alcanzaron el valor de 80 cm.
- El proyecto de irrigación Tinajones tiene por objeto la regulación de las aguas del río Chancay y las aguas del Atlántico provenientes de la cabecera de las cuencas de los ríos Chotano y Conchano.
- Por su capacidad del embalse y altura de la presa, la Presa Tinajones está en la categoría de grandes presas y sus daños potenciales aguas abajo son altos en pérdidas de vidas humanas y significativa pérdida económica.
- Los llenados y vaciados alternados del reservorio favorecen la formación de desplazamientos irreversibles en la dirección perpendicular del eje de la presa, así como el arrastre gradual de fracciones grano fino, de la parte alta de la presa.

### **Instrumentación Instalada**

- A nivel de fundación los piezómetros ubicados aguas arriba de la presa, siguen cercanamente los cambios en el nivel del embalse, mientras que los piezómetros ubicados aguas abajo de la presa muestran una respuesta mas lenta y un valor absoluto menor en el cambio de los niveles piezométricos. Esto indica que el Blanket impermeable es relativamente ineficaz en la reducción de la conexión entre el embalse y la parte aguas arriba de la fundación.
- En la sección 1+850 el Blanket parece ser mas eficiente las cercanías al núcleo (Los piezómetros N°9 y N°10 tienen lecturas mas bajas que el N°8). Se tiene evidencia que el Blanket en esta zona fue construido de mayor espesor que en la porción aguas arriba. En la sección 0+350 las lecturas del piezómetro N°10 permanecen altas aún

cuando el embalse permanece bajo, no se puede precisar con certeza la razón de este comportamiento.

- Los piezómetros ubicados en el cuerpo de la Presa siguen cercanamente la variación de los niveles de embalse, cuando este nivel permanece por encima de estos instrumentos, las lecturas realizadas en junio del 2000 son similares, que las lecturas de otras fechas con los mismos niveles de embalse, esto indica un comportamiento adecuado de estos piezómetros.
- El piezómetro N°8 ubicada en la trinchera impermeable de la sección 0+350 muestra una respuesta rápida a los cambios en el nivel del embalse, siendo la magnitud de los cambios piezométricos casi igual a los cambios en el nivel del embalse.
- No existen piezómetros en el espaldón aguas debajo de la presa o en la fundación para monitorear presiones de agua en esa zona.

### **Análisis de Infiltración**

- Se ha realizado el análisis de infiltración en la sección 1+850 de la Presa Principal Tinajones.
- Se puede notar que los valores de presión de poros obtenidos mediante el análisis de infiltración utilizando los programas de computo SEEP/W y ELF son similares a los obtenidos mediante la auscultación con los piezómetros eléctricos.
- Los piezómetros que presentan lecturas que difieren demasiado de los valores teóricos se encuentran en mal estado.
- En el análisis de infiltración se ha asumido valores teóricos de permeabilidad, estos valores están en una proporción de 1 a 10 para materiales del núcleo, fundación y espaldones, además, considera el suelo como isotropico( $k_x=k_y$ ).



### **Análisis de Estabilidad de Taludes**

- Se ha realizado un análisis de estabilidad de taludes considerando superficies de falla circulares e irregulares (cuñas). En este caso se plantea la posibilidad del filtro ocluido, es decir que esté saturado cuando el nivel de embalse haya alcanzado un nivel superior a la cota máxima del filtro, esta condición considera al filtro con una carga de presión de 215 y se ha hecho variar la cota del nivel de embalse entre 200 y 210 para los demás materiales del cuerpo de la Presa. En este caso han sido utilizados las resistencias de corte no drenadas y los factores de seguridad obtenidos
- En presencia de las aguas de lluvia excesivas causadas por el fenómeno El Niño, las grietas del núcleo son llenadas, se considera al material del núcleo y blanket con cargas de presión total de 215 m, para realizar este análisis se ha hecho variar el nivel de embalse entre 200 y 210 m.s.n.m. las superficies de falla considerados son circulares y de cuña. Los factores de seguridad obtenidos varían desde 1.0 a 1.23
- Es evidente a partir de la inspección de la Tabla N° 6.5, que la presencia de agua de infiltración dentro del cuerpo de la presa, tiene un efecto muy pronunciado sobre el factor de seguridad. Sin embargo el llenado del filtro presente en el espaldón aguas arriba o el llenado de las grietas en el núcleo, subiendo la carga piezométrica en estos materiales hasta la cota 215 m.s.n.m. induce una disminución muy sensible en el factor de seguridad, hasta valores cerca de 1.0, valor límite de estabilidad con el cual se pueden iniciar desplazamientos irreversibles, tales como se observaron en las lluvias excepcionales que cayeron en 1983 y 1998.
- En el caso de estabilidad a largo plazo los resultados de este análisis expresado en términos de factor de seguridad indican un comportamiento adecuado de la estructura, evidenciándose esto, porque los factores de seguridad son superiores a 2.0 en todos los casos, siendo este valor mayor que el mínimo exigido por las normas para el diseño de presas (USCOLD).

- Los análisis de estabilidad de taludes realizados utilizando el programa de computo SLOPE/W 5.0 arrojó resultados similares a los obtenidos con el programa PCSTABL6H.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda continuar con el monitoreo periódico de la instrumentación instalada para detectar posibles anomalías en el comportamiento de la Presa Tinajones.
- Proteger la corona de la presa ante la infiltración del agua superficial.
- Las subidas y bajadas en el nivel de embalse de la presa se debería hacer con una velocidad que no ponga en riesgo la estabilidad del talud aguas arriba de la presa

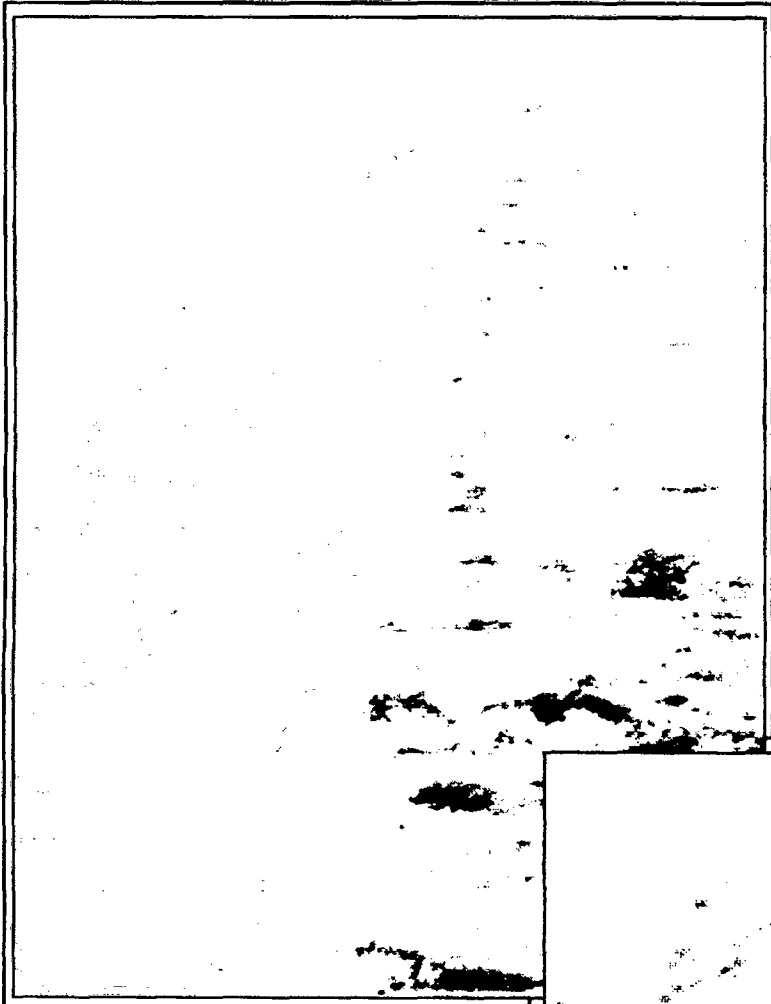
## REFERENCIAS

- Alva Hurtado J., 2000, Estudio de Peligro Sísmico Presa Tinajones.
- Bishop and Bjerrum, i., 1960, The Relevance of the Triaxial test to the Solution of Estability Problems, Pocc. ASCE Research Conference of Shear Strength of Cohesive Soil, Boulder, Colorado, June.
- Bishop, A.W. and Morgenstern, N., 1960. Stability Coefficients For Earth Slopes. Geotechnique, Vol. 10, No. 4, pp. 164 169.
- Corey, J.C., 1957. Measurement of Water and Air Permeability in Unsaturated Soil. Soil Science of America, Vol. 21.
- Cesel S.A. Ingenieros Consultores, 1999., Estudio Hidrológico y de Determinación de los Límites de Inundación Aguas Abajo del Reservorio Tinajones, INADE-DEPOLTI.
- Consorcio Harza- Hidroenergía, 2000., Estudio en Modelo Matemático del Comportamiento Futuro de la Presa Principal Tinajones y su Fundación, Informe Final.
- CISMID-UNI-FiC., 1990, Memorias del Seminario Diseño de Presas de Tierra, Lima-Perú.
- Departament of the Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, 1970, Engineering and Design Stability of Earth and Rock-Fill Dams
- Fellenius, W., 1936, Calculation of the Stability of Earth Dams. Proceedings of the Second Congress of Large Dams, Vol. 4, pp. 445-463.
- Fell R, Macgregor & Stapledon, 1992, Geotechnical Engineering of Embankment Damns

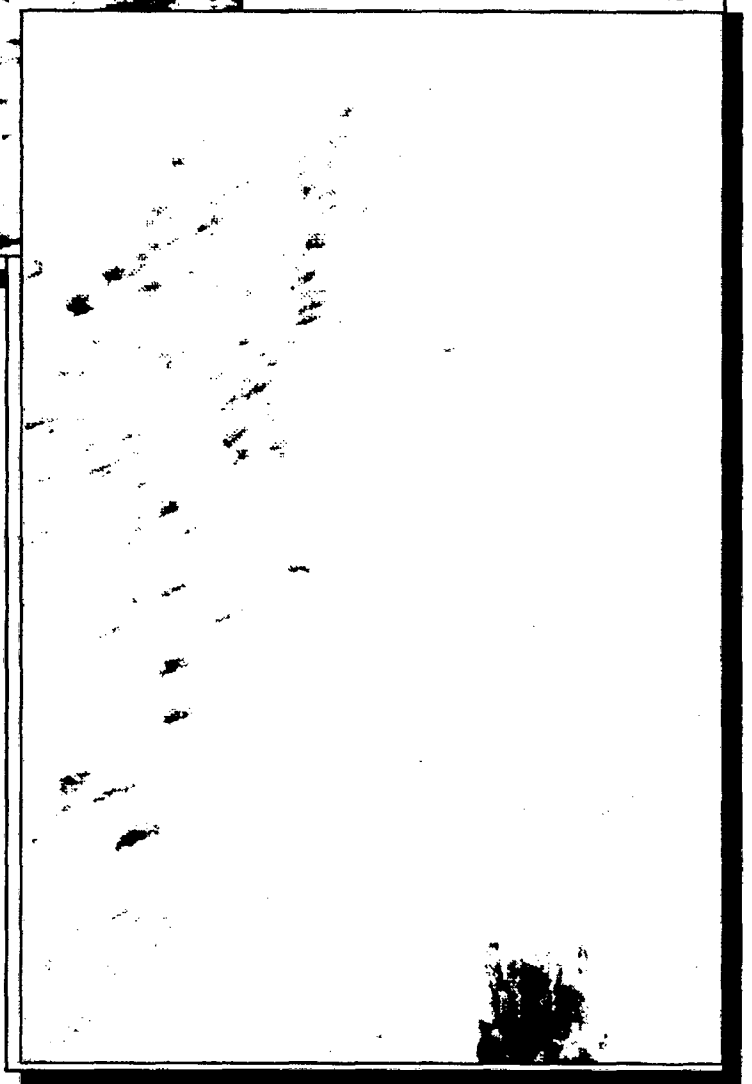
- Green, R.E. and Corey, J.C., 1971. Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 35, pp. 3-8.
- I. Ergateudis, B. M. Irens & O. C. Zienkiewicz, Curved isoparametric, Quadrilateral Elements for Finite Element Analysis, Journal of the Engineering Mechanics Division, University of Wales, Swance.
- Klohn- Crippen, 1998, Elaboracion del Expediente Técnico para la Racionalización, Mantenimiento y/o Reemplazo de la Instrumentación de Auscultación Instalada en la Presa Tinajones.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969. Soil Mechanics. John Wiley and Sons, pp. 359 365.
- Low, Teem – Chie, 1975, Deformations of Hearth Dams During Constructions. Ph. D. Thesis, University of Alberta, Edmonton.
- Marsal R y Resendiz D., 1975, Presas de Tierra y Enrocado, México
- P.A Witherspoon, I. Javandel & S. P. Neuman, “ Use of Element in Solvin Transiet Flow Problem in Aquifer Sistem. University of California, Berkeley.
- O. Zienkiewicz, Paul Mayer and Yau Kai Cheung, 1966, Solution of Anisotropics seepage Finite Element, Journal of the Engineering Mechanics Division, pp 111- 121.
- Rmbir s. Sandhu, M. ASCE, Finite Element Anlysis of Seepage in Elástica Media, Journal of the Engineering Mechanics Division, pp 41- 49  $\bar{w}^0$
- W. D. Lian Finn, A. M. ASCE, Finite Element Anlysis of Seepage Through Dams, Journal of the Engineering Mechanics Division, pp 41- 49  $\bar{w}^0$

- Shlome p. Neuman and Paul a. Witherspoon, Finite Element method of Analysis Steady Seepage With a Free Surface, University of California, Berkeley Water Resources research, jun 1970.
- Skempton, A. W., 1954, The Pore Pressure Coeficient A and B, Geotechnique, Vol. 4, pp. 143 - 157
- Suares Diaz, J., 1998, Deslizamiento y Estabilidad en Zonas Tropicales, Instituto de Investigación Sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia
- UNI – CISMID –FIC, Memorias del seminario Diseño de Presas de Tierra, Mayo 1990
- United Status Department of The Interior Bureau of Reclamation, 1965 Dasing of Small Dams.
- Vallarino Canovas del Castillo E., 1998, Tratado Básico de Presas, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- Whitman, R.V. and Bailey, W.A., 1967. Use of Computer for Slope Stability Analysis. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division of ASCE, Vol. 93, No. SM4.
- Zienkiewics, O.C. and Taylor, R.I., 1989, The Finite Element Method, 4th Ed., Vol. 1. McGraw – Hill.

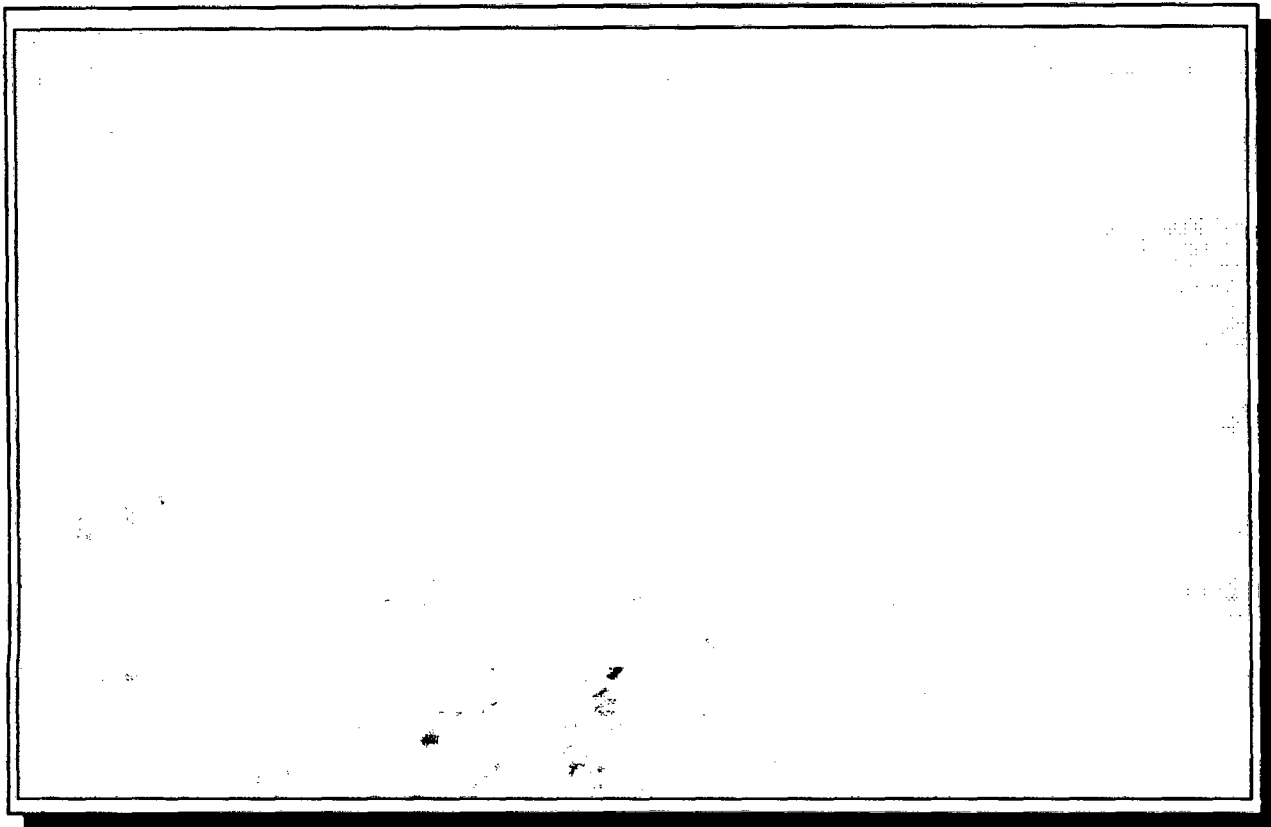
**PANEL FOTOGRAFICO**



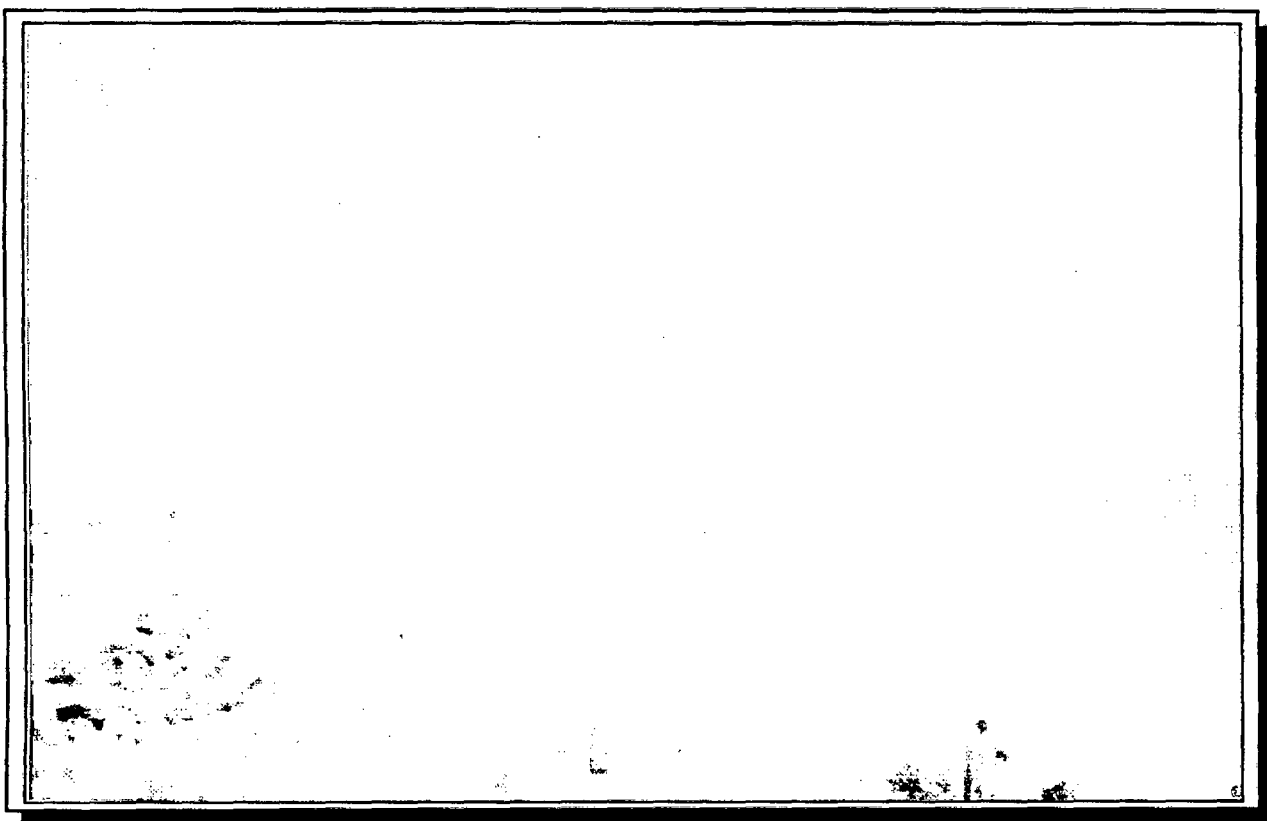
**Foto N° 01:** Vista general de la presa principal Tinajones



**Foto N° 02:** Vista de la corona de la presa principal Tinajones

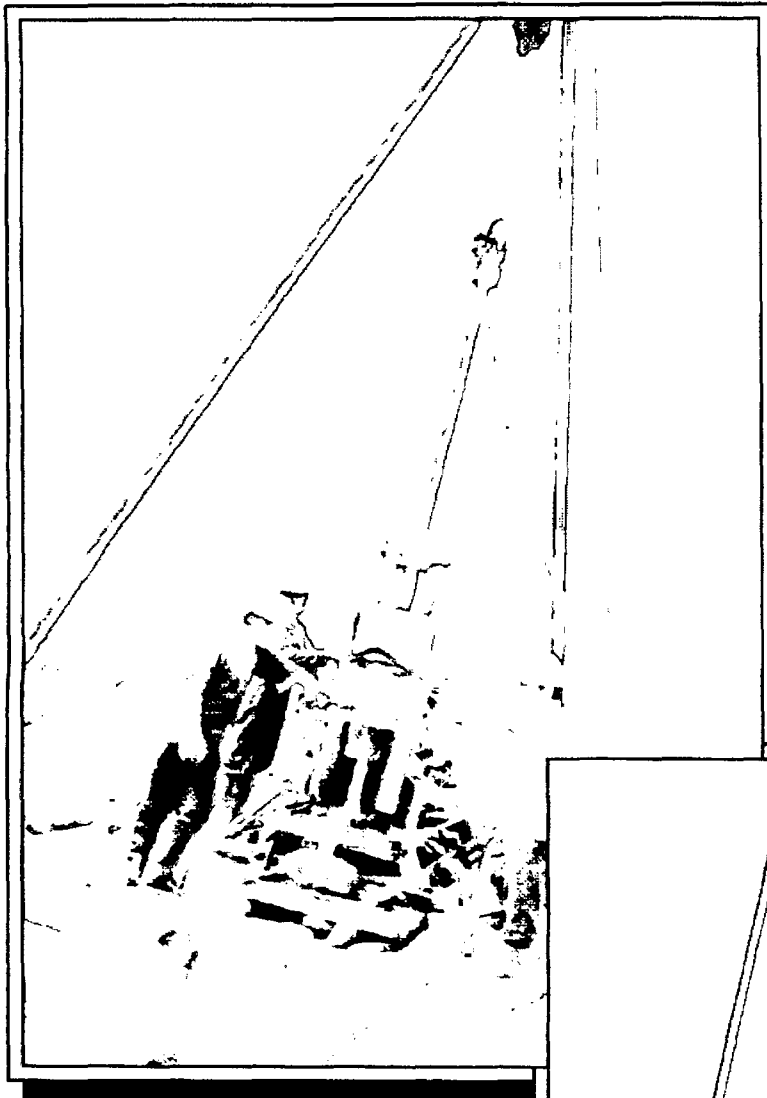


**Foto N° 03:** Vista general de la presa principal Tinajones ( Chiclayo-Lambayeque)



**Foto N° 04:** Vista del embalse Tinajones ( Chiclayo –Lambayeque)

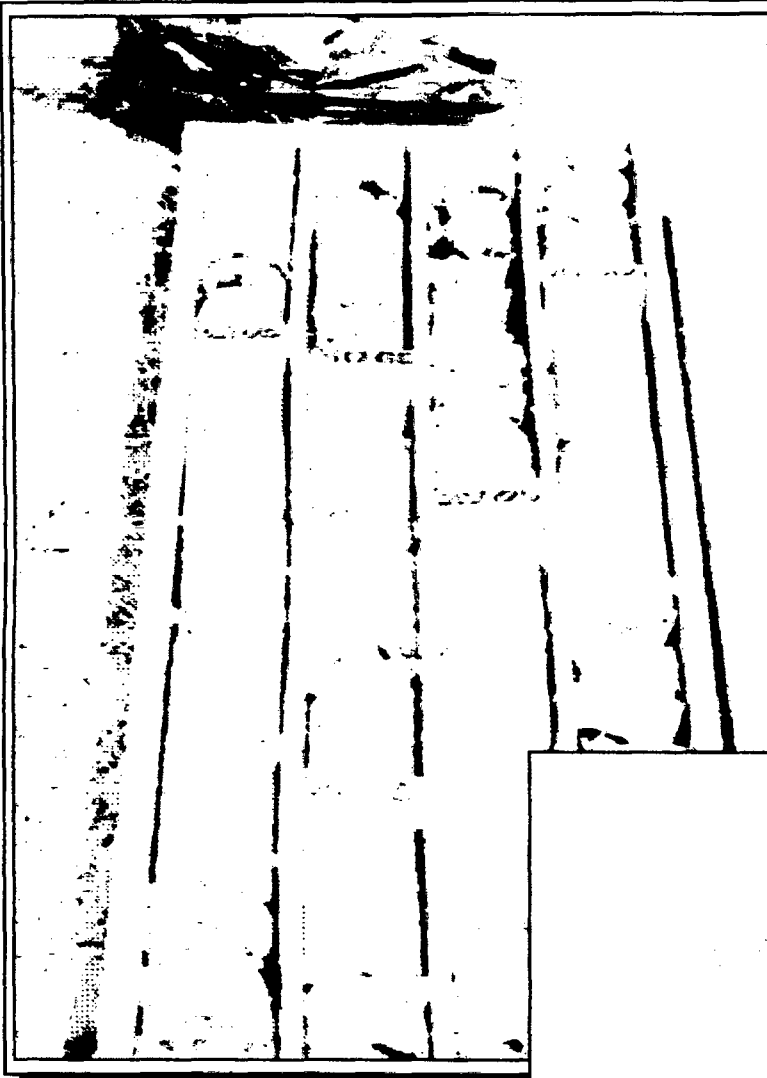




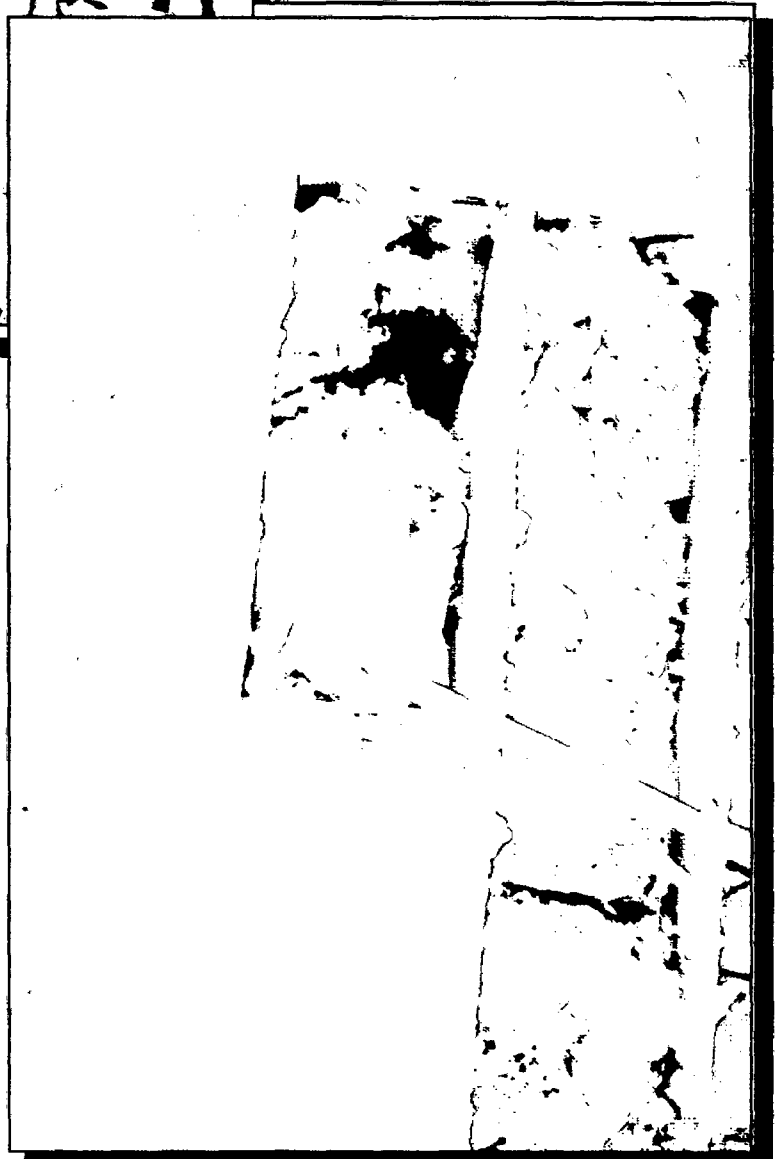
**Foto N° 05:** Vista de la perforación diamantina en la corona de la presa principal Tinajones



**Foto N° 06:** Vista de la perforación diamantina P-03 en la corona de la presa principal Tinajones



**Foto N° 07:** Vista de la perforación diamantina en la corona de la presa principal Tinajones



**Foto N° 08:** Vista de la perforación diamantina P-03 corona de la presa principal Tinajones



**Foto N° 09:** Investigación geotécnica mediante perforación diamantina (P-4) ubicada al pie de la presa principal Tinajones



**Foto N° 10:** Medida del nivel de agua en el piezómetro instalado en la perforación P-4 ubicado en el pie de la presa Tinajones (Km. 0+850)



**Foto N° 11:** Investigación geotécnica mediante trincheras en la corona de la presa principal Tinajones ( ensayo de densidad de campo)



**Foto N° 12:** Investigación geotécnica mediante trincheras en la corona de la presa principal Tinajones



**Foto N° 13:** Vista de un vertedero de aforos ubicado en el sector aguas abajo de la presa principal Tinajones

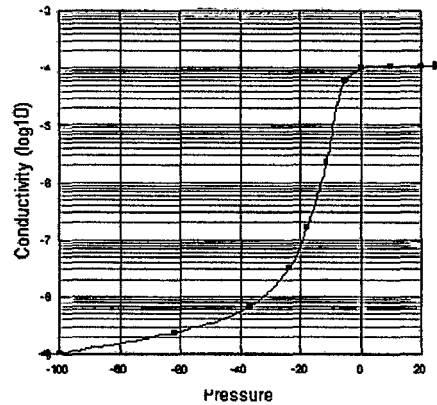
**LAMINAS**

# **CONDUCTIBILIDAD HIDRAULICA**

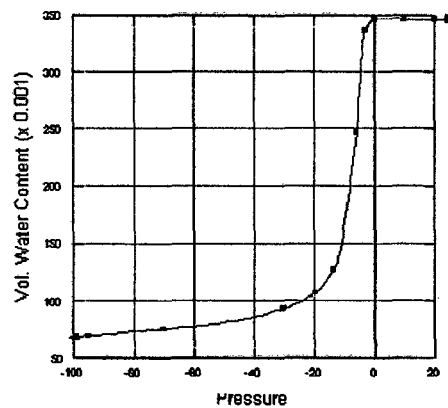
## ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

### LAMINA 4.1: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA LA ARENA UNIFORME

Autor	Swanson, 1991
Conductibilidad saturada	$1 \times 10^{-4}$ m/sec
Porosidad	0.35
Porcentaje de Arena	95%
D10	0.1 mm



(a) Conductibilidad hidráulica



(b) Contenido de agua

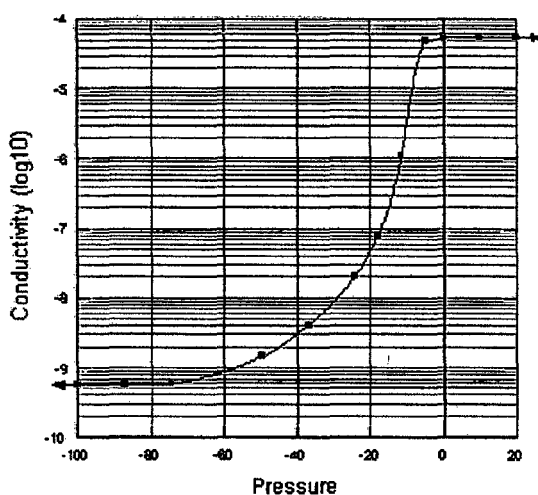


## ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

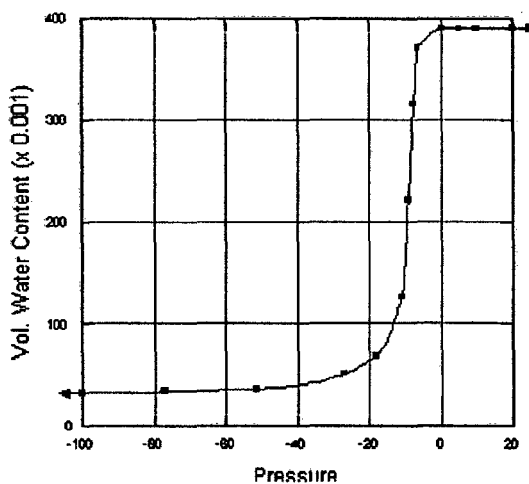
### LAMINA 4.2: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA

#### LA ARENA

Autor	Ho,197
Conductibilidad saturada	$5.4 \times 10^{-5}$ m/sec
Porosidad	0.39



(a) Conductibilidad hidráulica

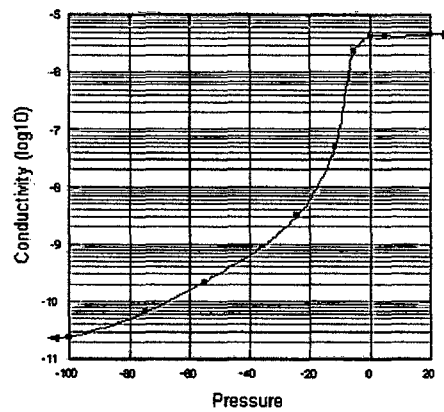


(b) Contenido de agua

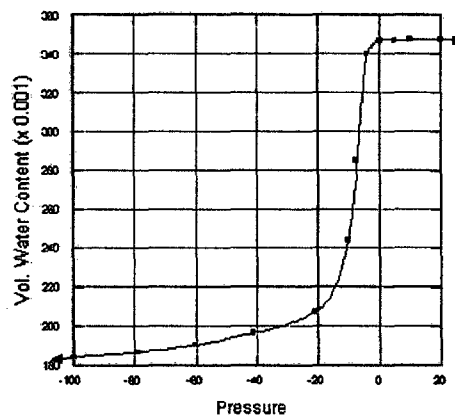
## ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

### LAMINA 4.3: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA LA ARENA FINA

Autor:	Bruch, 1993,
Conductibilidad saturada:	$4.3 \times 10^{-6}$ m/sec
Porosidad:	0.35
Porcentaje de Arena :	96%
D10:	0.093 mm



(a) Conductibilidad hidráulica

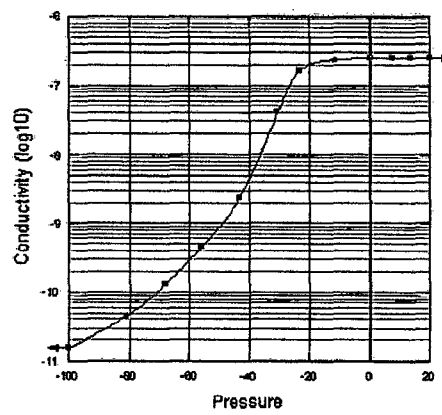


(b) Contenido de agua

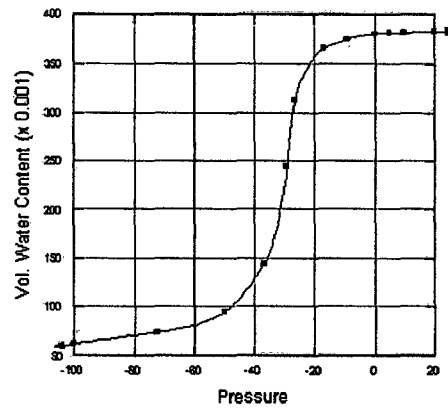
# ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

## LAMINA 4.4: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA EL CIENO

Autor:	Ho, 1979
Conductibilidad saturada:	$2.5 \times 10^{-7}$ m/sec
Porosidad:	0.38



(a) Conductibilidad hidráulica



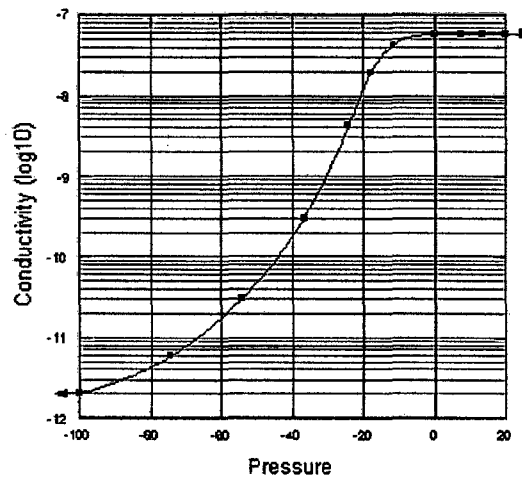
(b) Contenido de agua

# ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

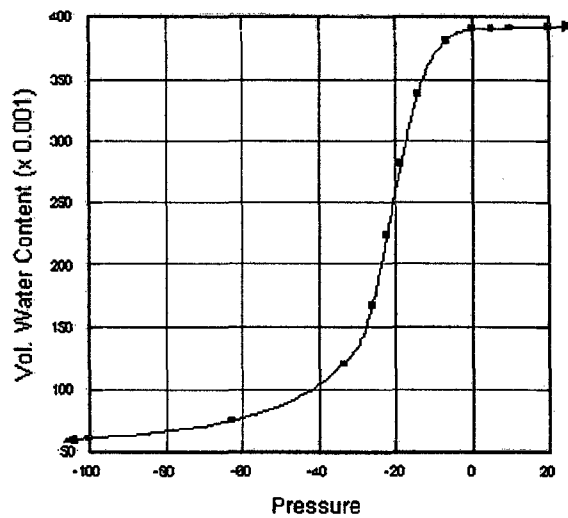
## LAMINA 4.5: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA

### EL CIENO (Tailings)

Autor:	Gonzalez y Adams, 1980,
Conductibilidad saturada	$5.8 \times 10^{-8}$ m/sec
Porosidad:	0.30



(a) Conductibilidad hidráulica

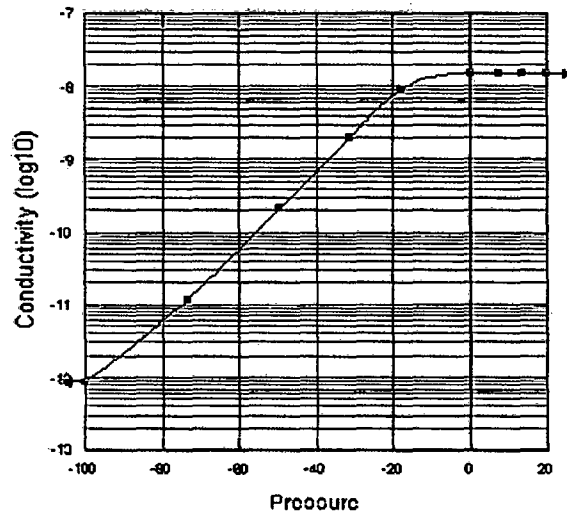


(b) Contenido de agua

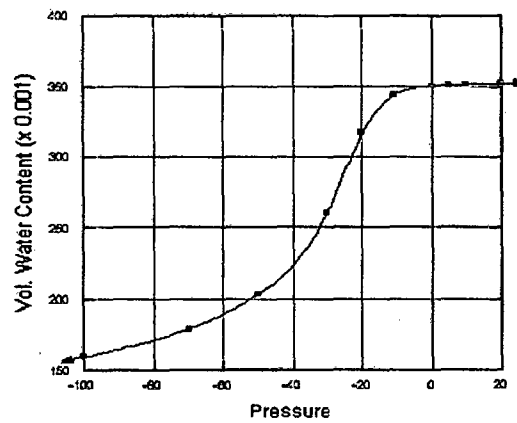
## ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN ESTRUCTURAS DE TIERRA

### LAMINA 4.6: CONDUCTIBILIDAD HIDRÁULICA Y CONTENIDO DE AGUA PARA CIENO ARENOSO ARCILLOSO

Autor	Huang, 1994,
Conductibilidad saturada	$1.5 \times 10^{-8}$ m/sec
Porosidad	0.35
Porcentaje de Arena	52%
Porcentaje de Cieno	38%
Porcentaje de Arcilla	10%



(a) Conductibilidad hidráulica



(b) Contenido de agua

**GENERALES**

**ANEXO A**  
**AUSCULTACION DE LA**  
**INSTRUMENTACION**

# **CONTROL DE PIEZOMETROS**



**SECCION 0+350**

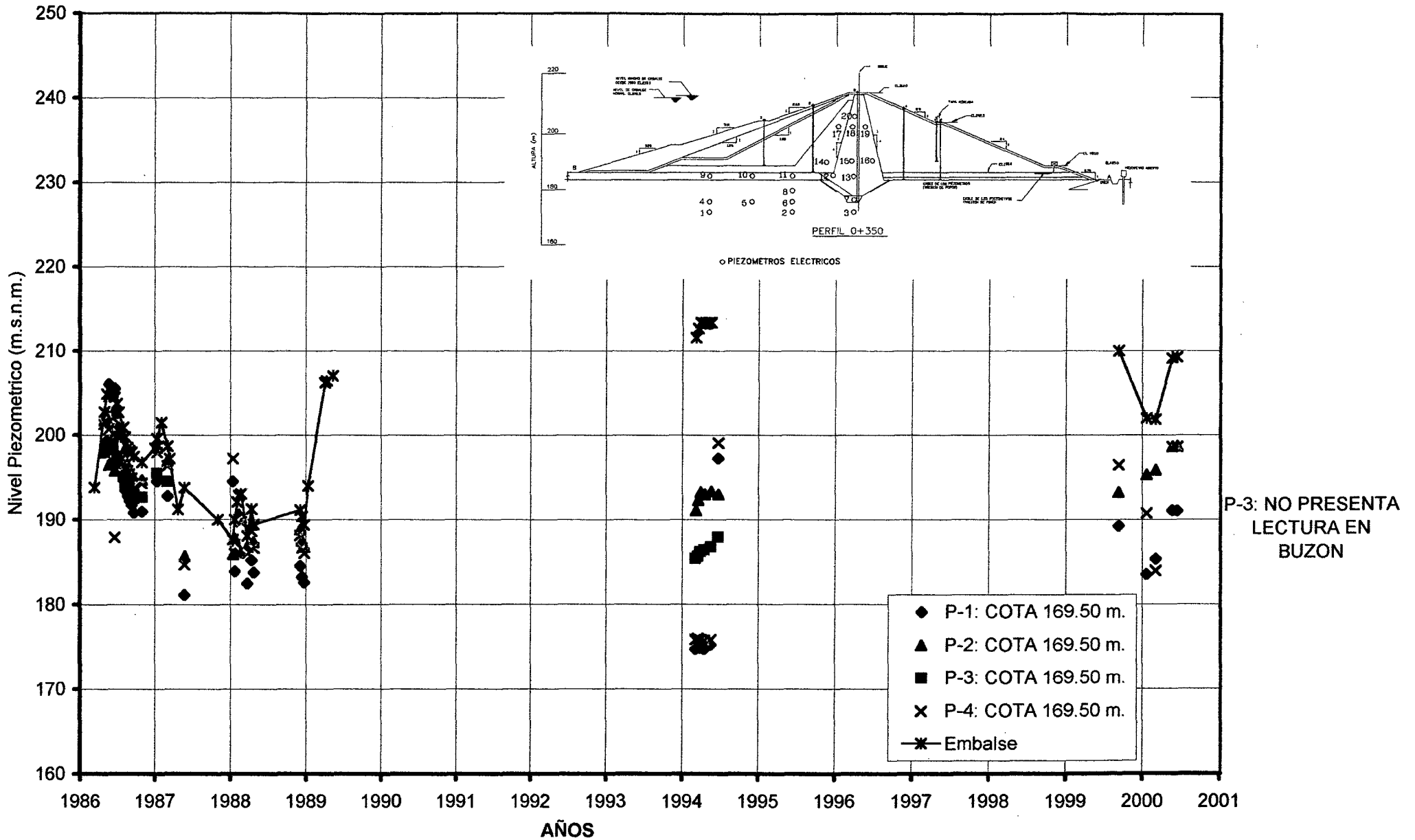
**SECCION 0+850**

**SECCION 1+850**

# **REGISTRO DE PIEZOMETROS**

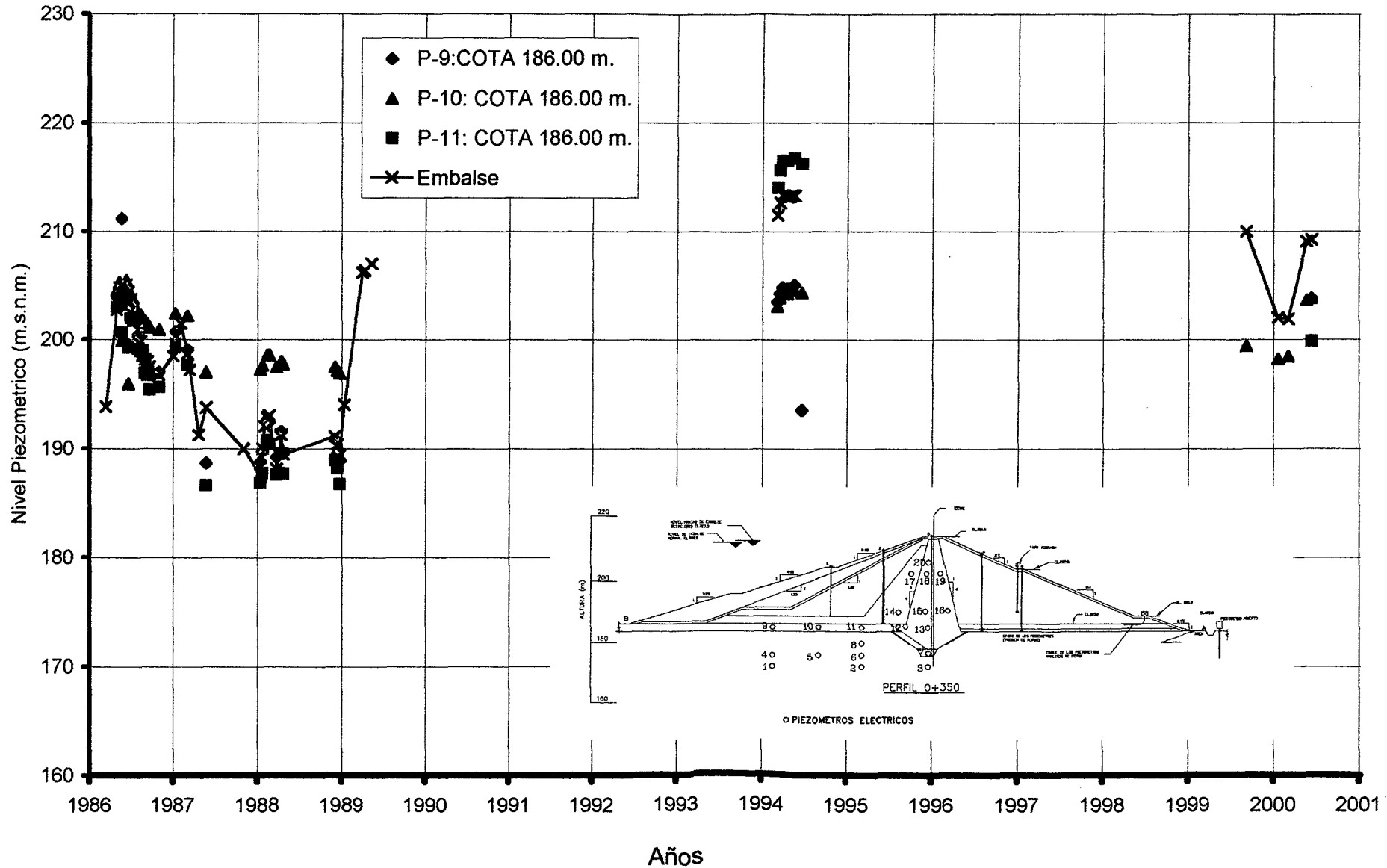
**SECCION 0+350**

**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-A: PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DE LA FUNDACIÓN**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+350)**



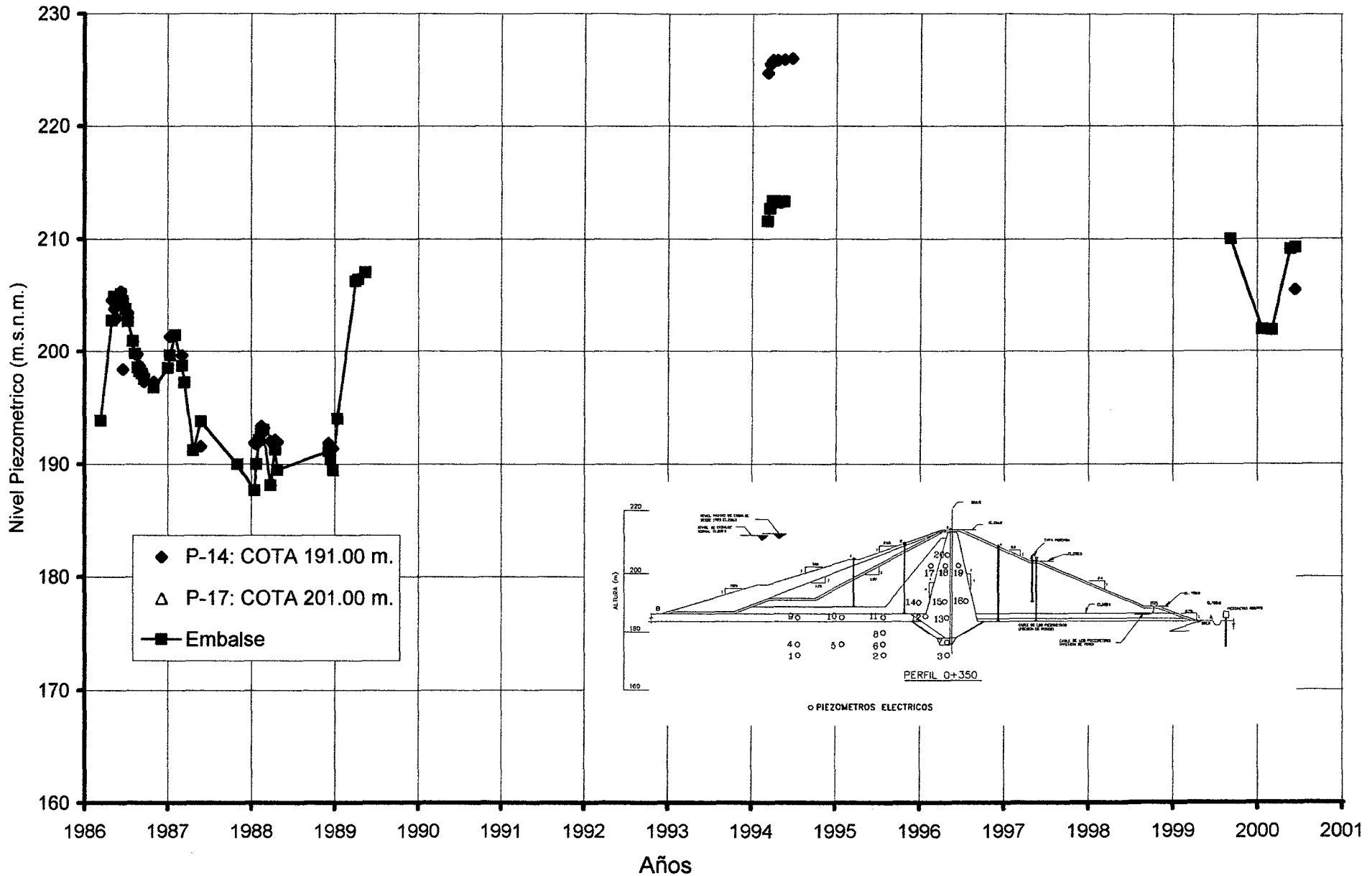


**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-C: PIEZÓMETROS EN EL BLANKET DE IMPERMEABILIZACIÓN**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+350)**

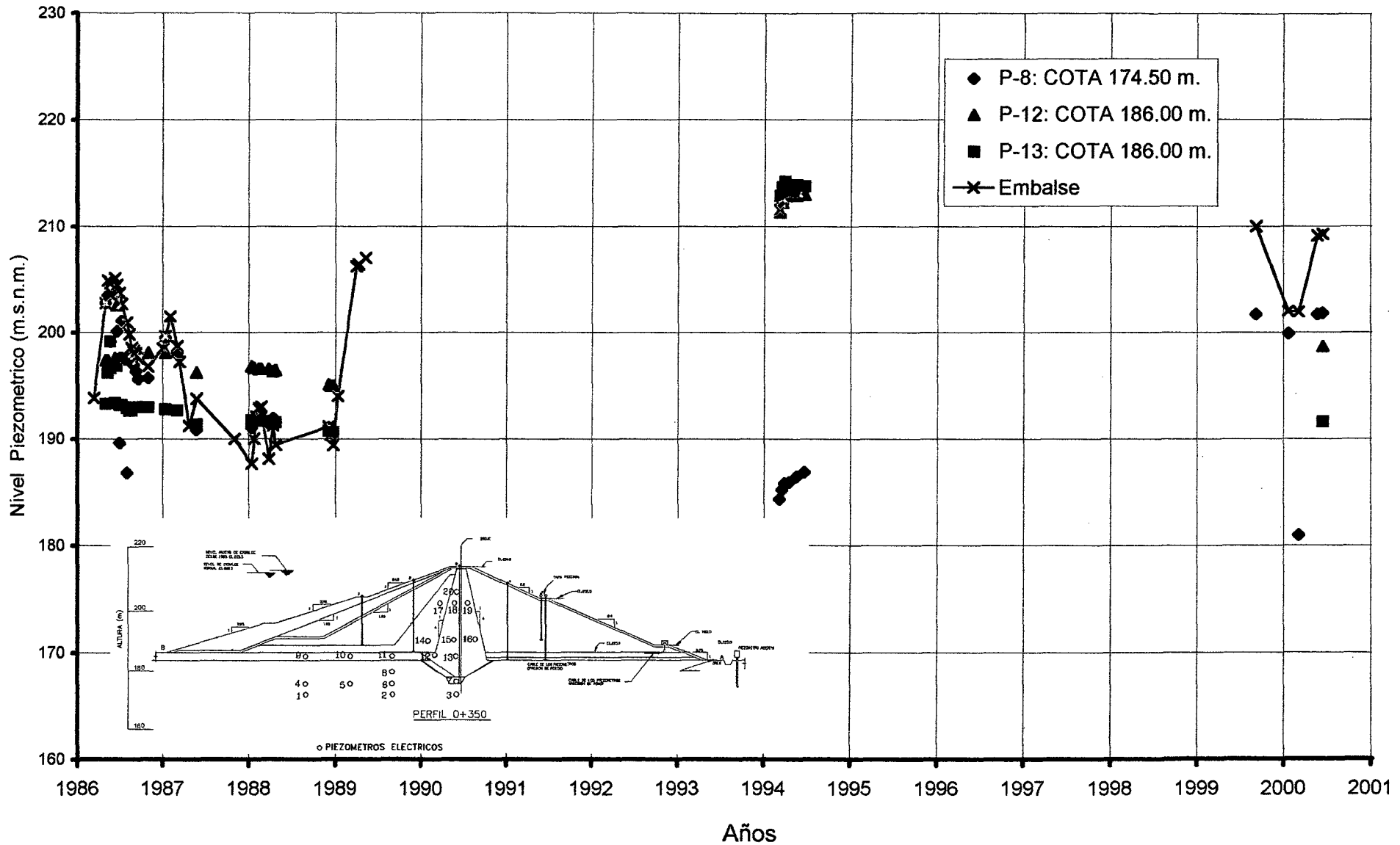




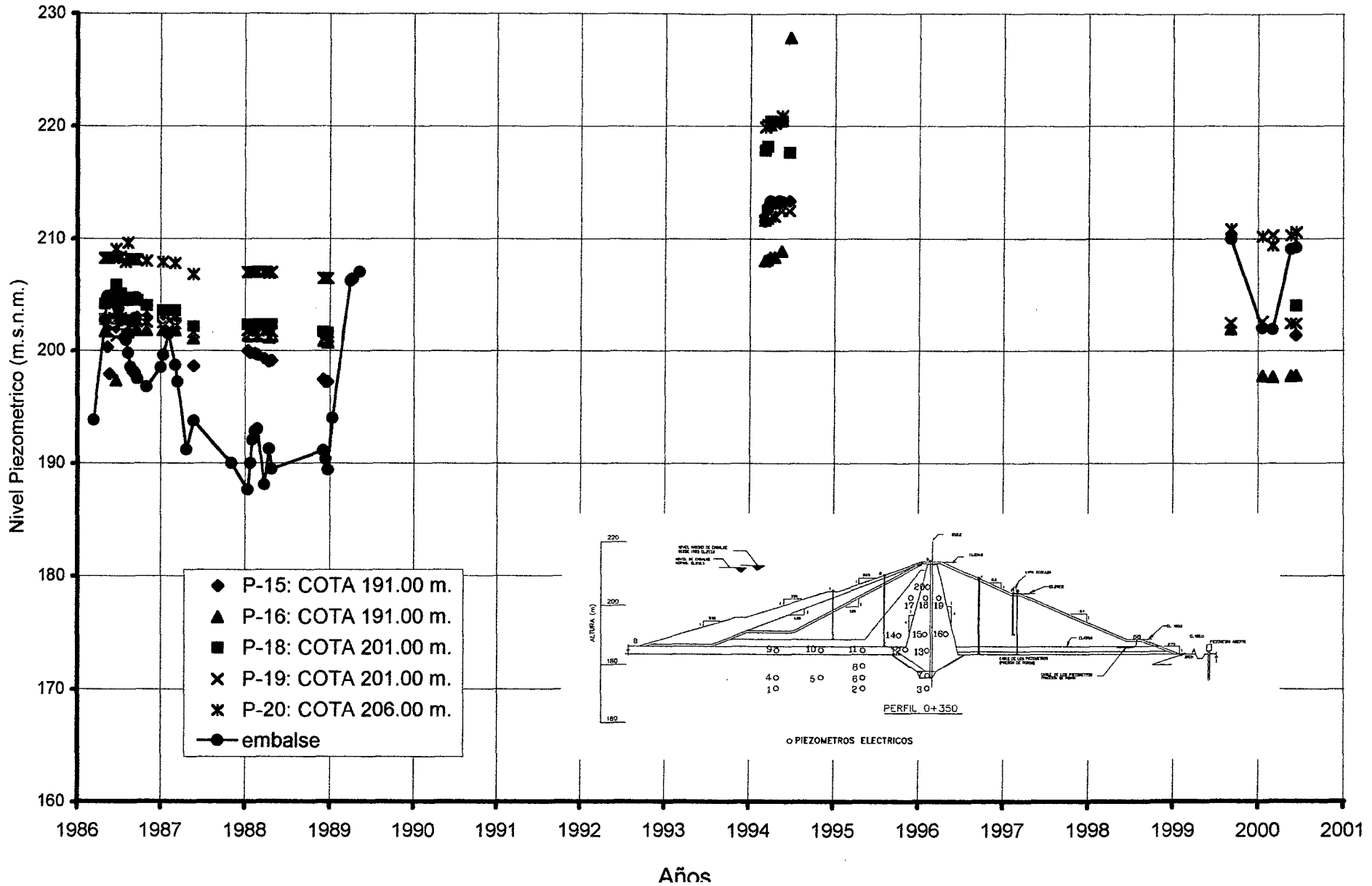
**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-D: PIEZÓMETROS EN EL CUERPO DE LA PRESA**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+350)**



**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-E:PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DEL NUCLEO IMPERMEABLE**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+350)**

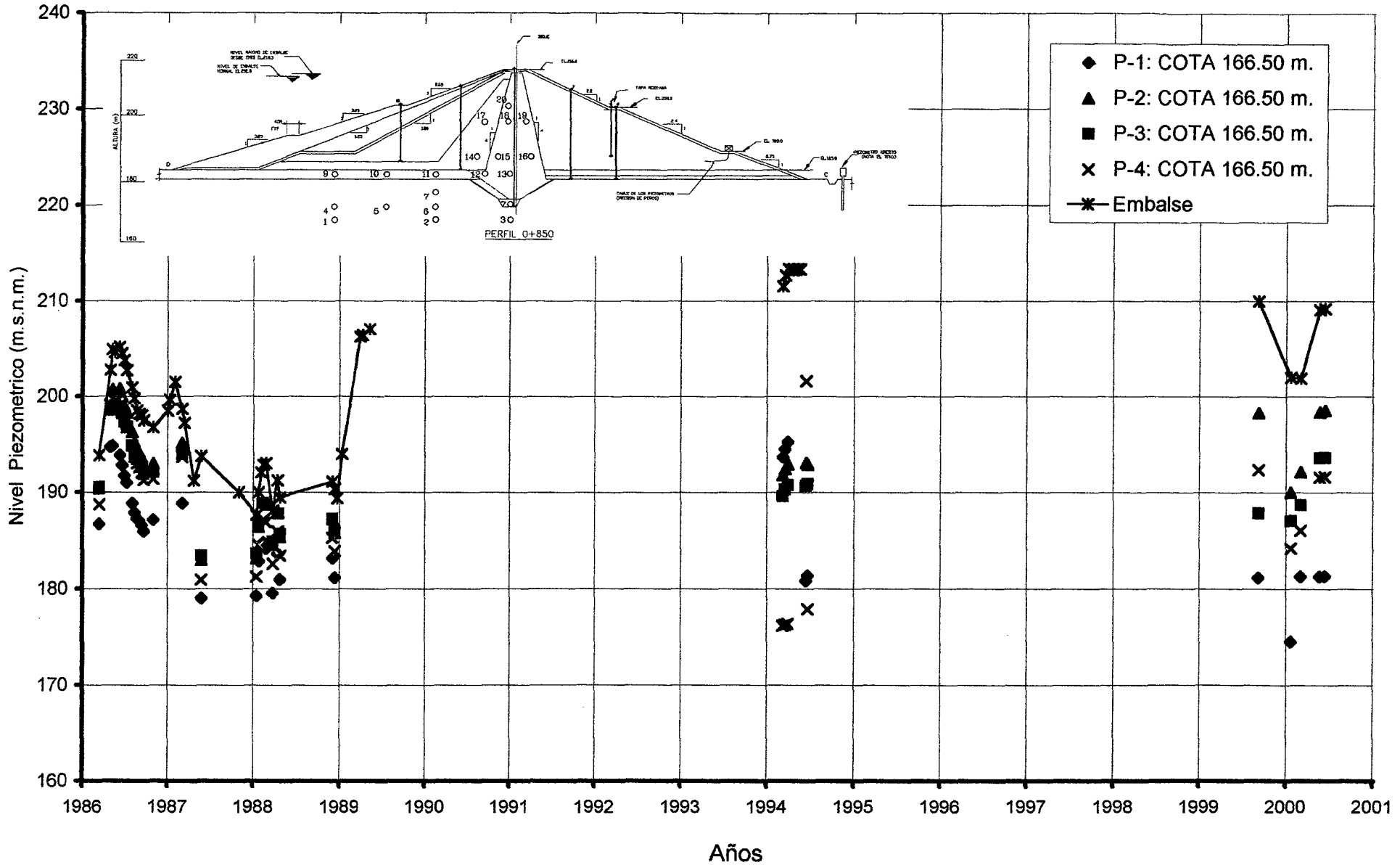


**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-F: PIEZÓMETROS EN LA PARTE SUPERIOR DEL NUCLEO IMPERMEABLE**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+350)**



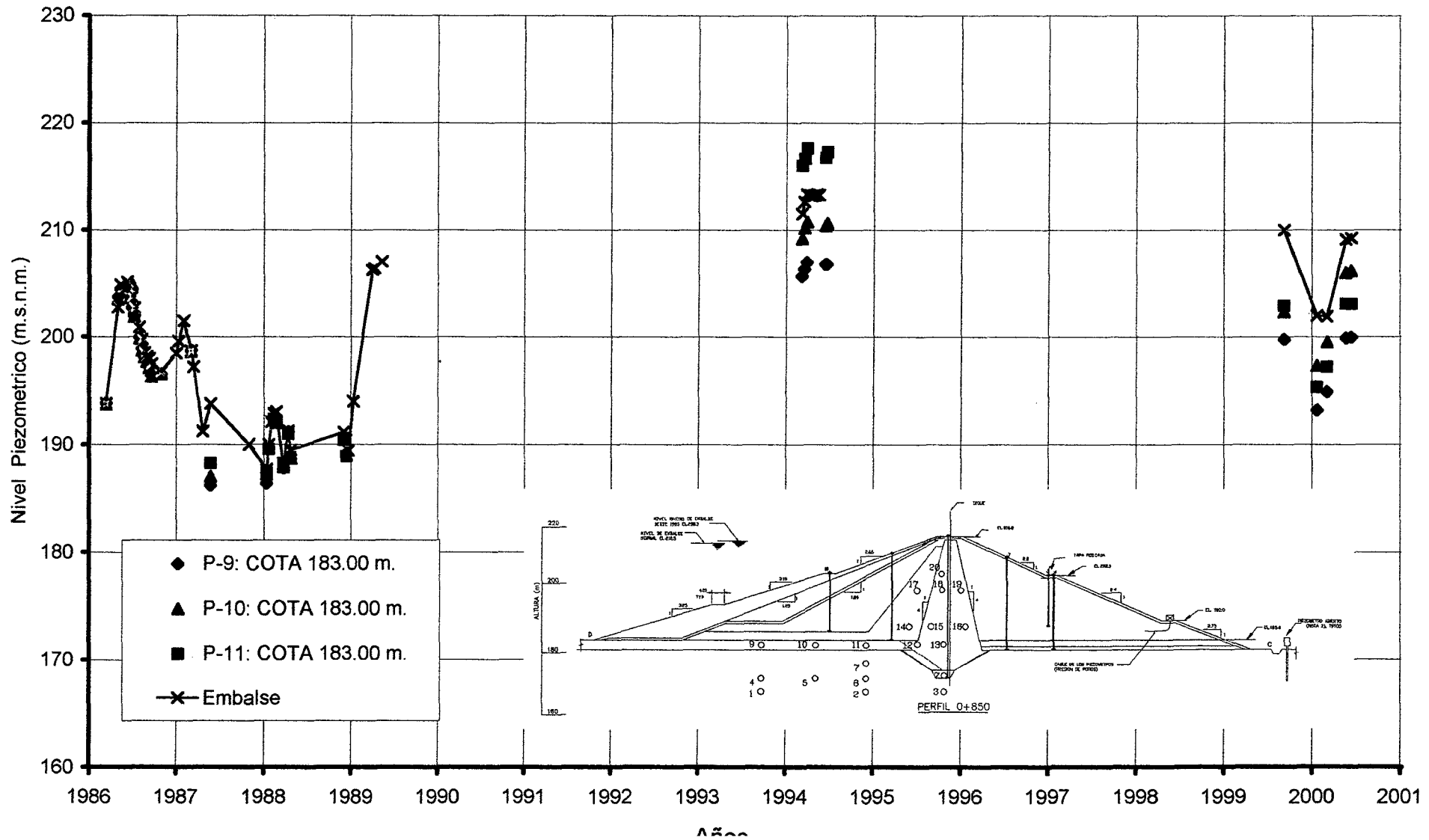
**SECCION 0+850**

**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-G: PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DE LA FUNDACIÓN**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+850)**

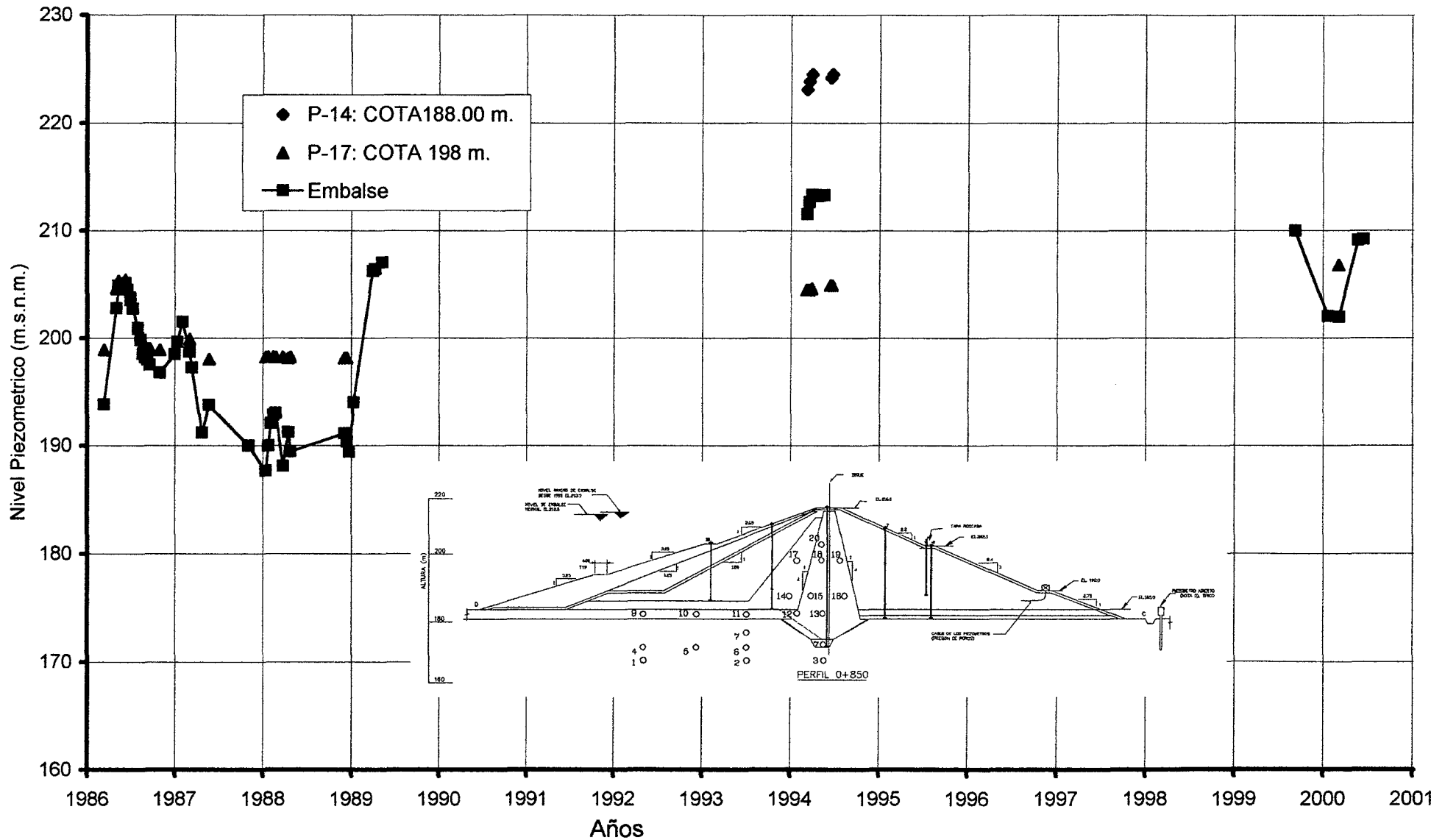




ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
 LAMINA 5.15-I: PIEZÓMETROS EN EL BLANKET DE IMPERMEABILIZACIÓN  
 PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+850)

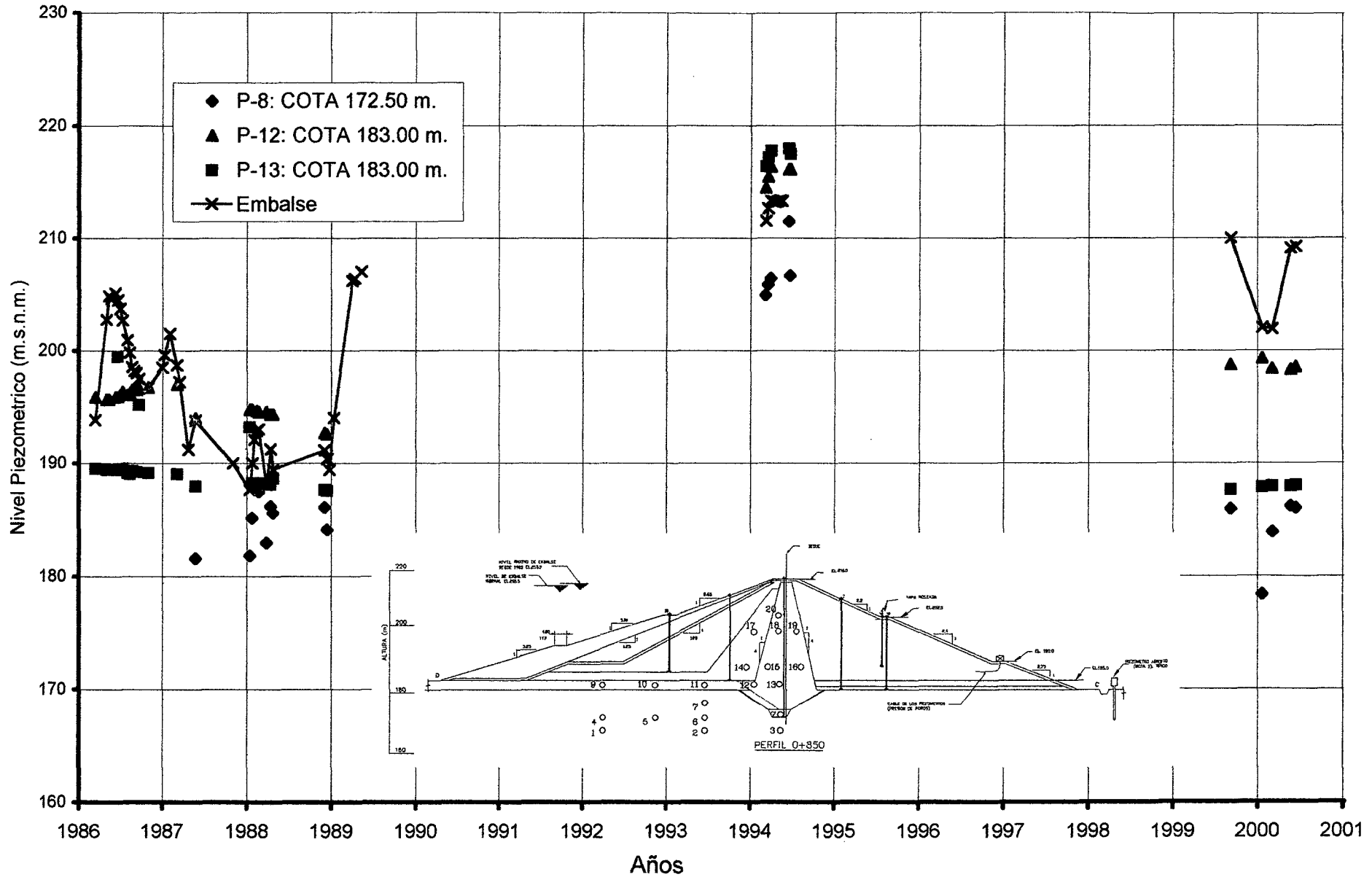


ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
 LAMINA 5.15-J: PIEZÓMETROS EN EL CUERPO DE LA PRESA  
 PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+850)

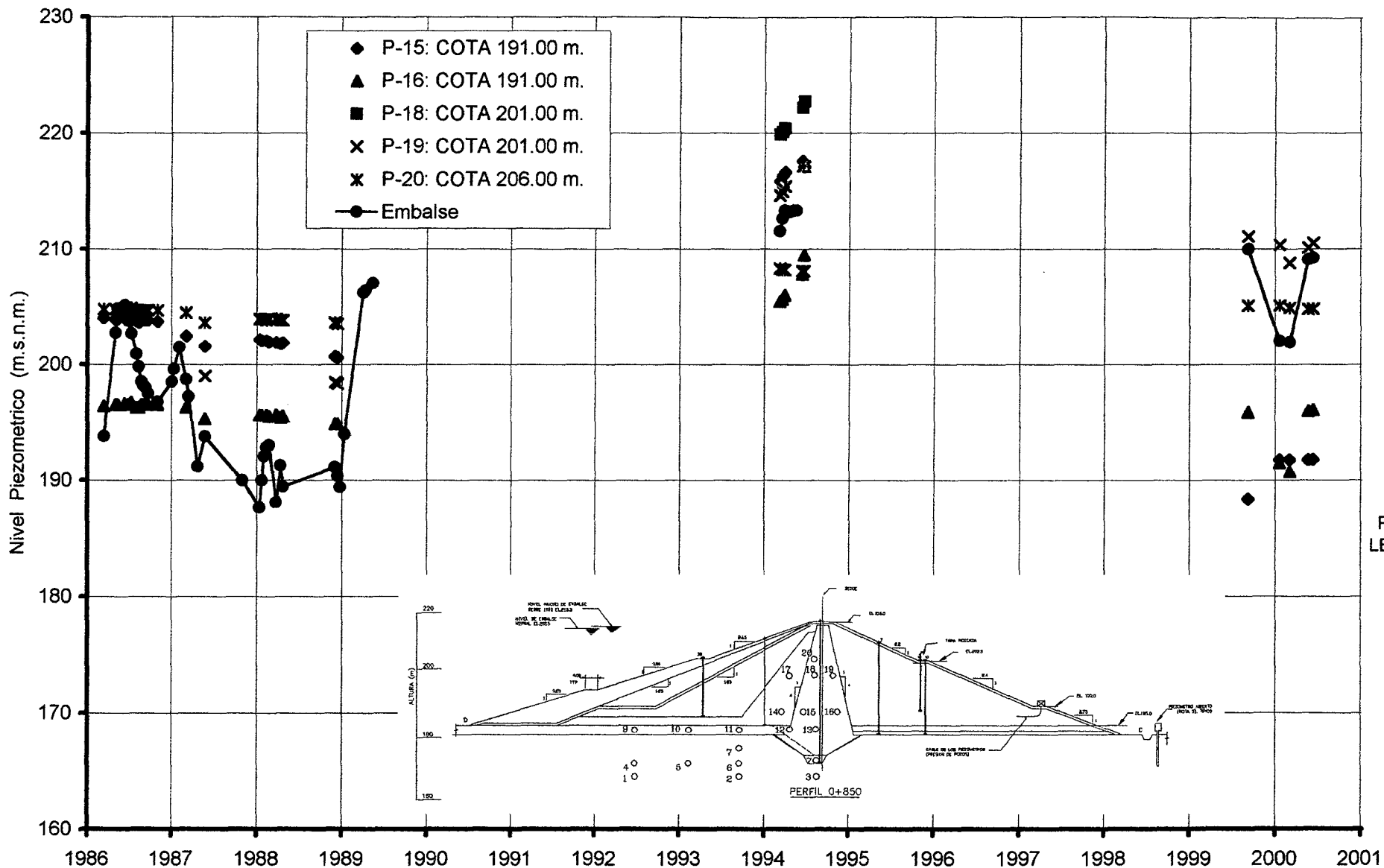




**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-K: PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DEL NUCLEO IMPERMEABLE**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+850)**



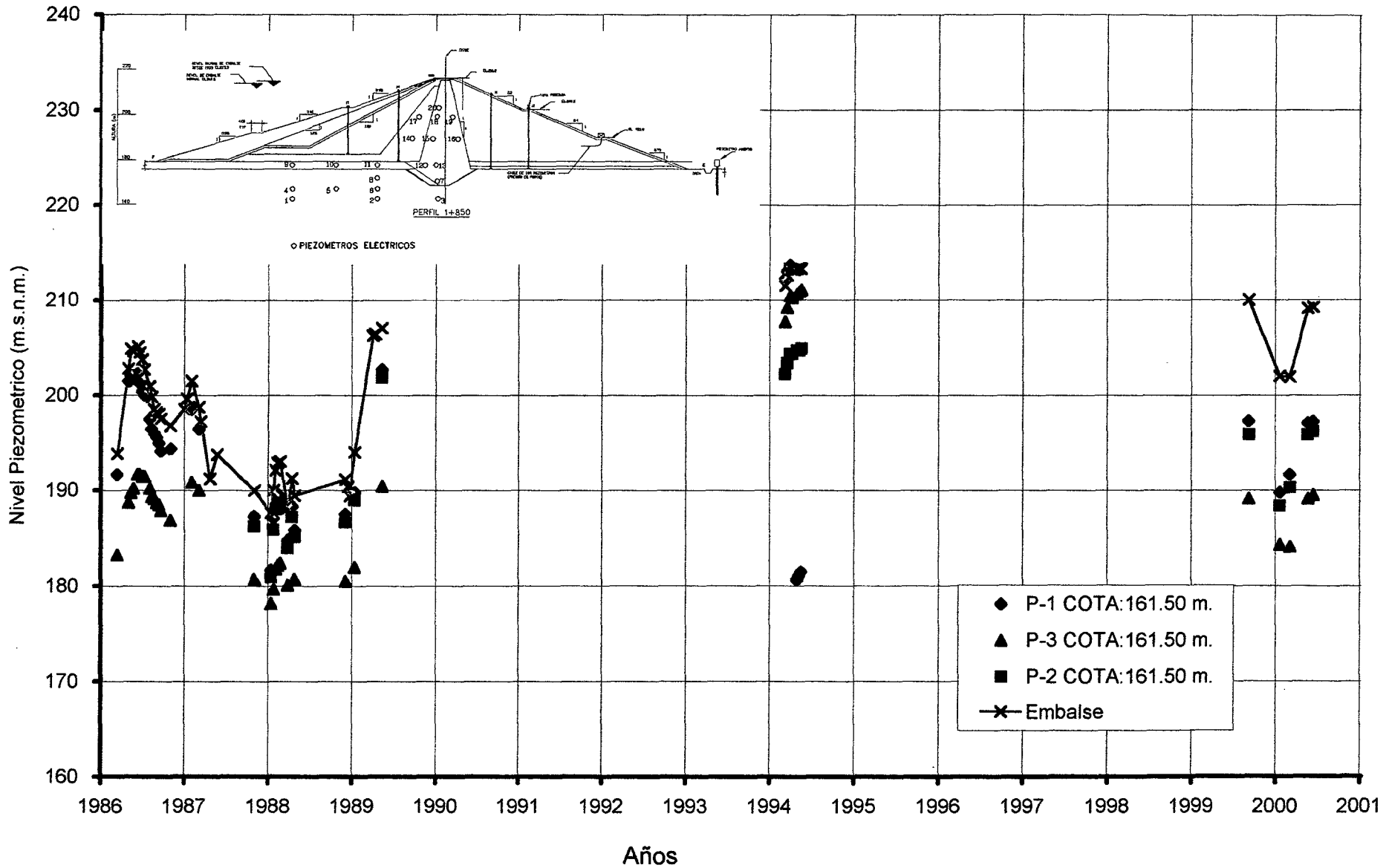
**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-L: PIEZÓMETROS EN LA PARTE SUPERIOR DEL NUCLEO IMPERMEABLE**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 0+850)**



P-18: NO PRESENTA LECTURA EN BUZON

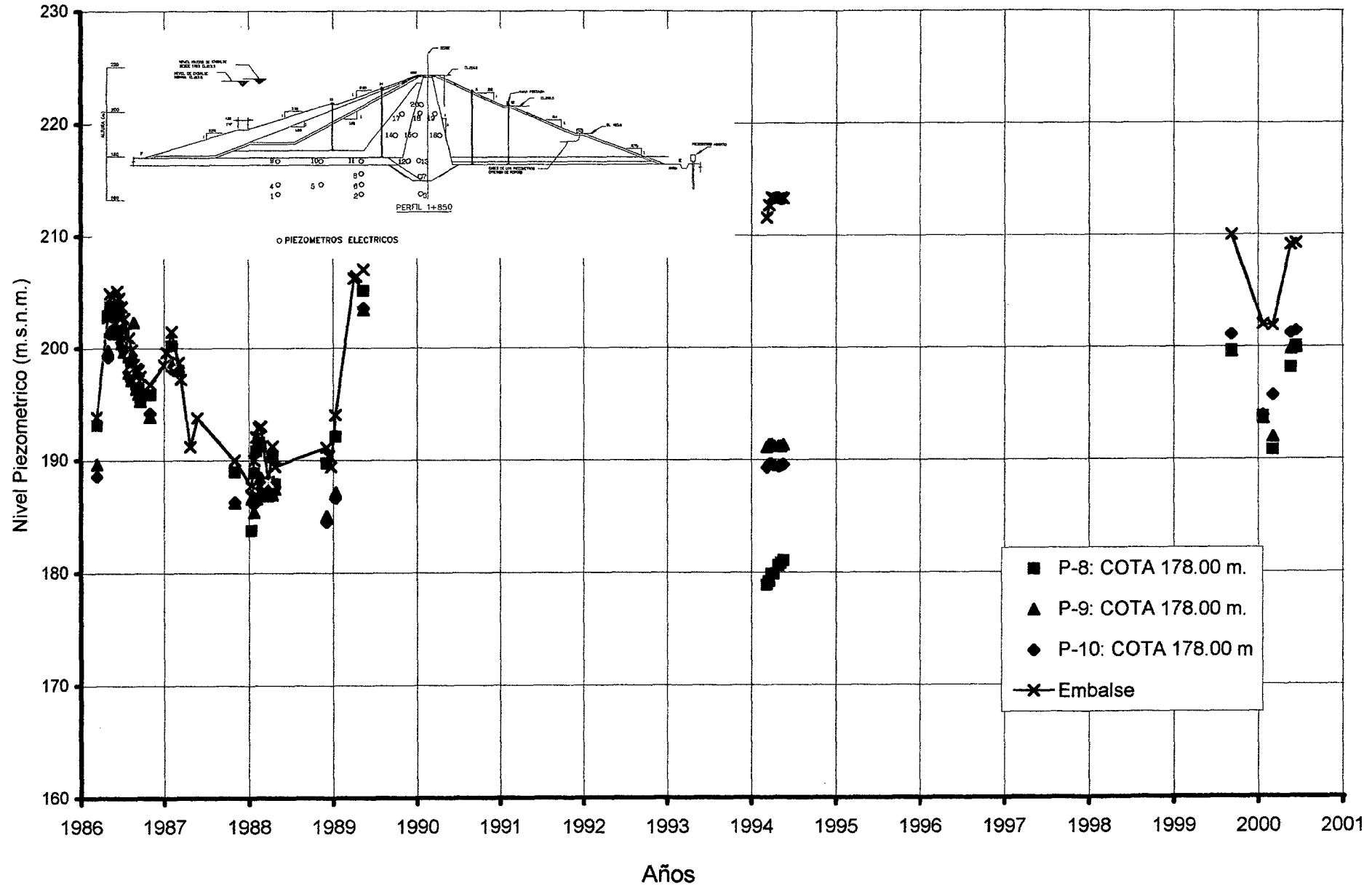
**SECCION 1+850**

**ANÁLISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5. 15-M: PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DE LA FUNDACIÓN**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 1+850)**

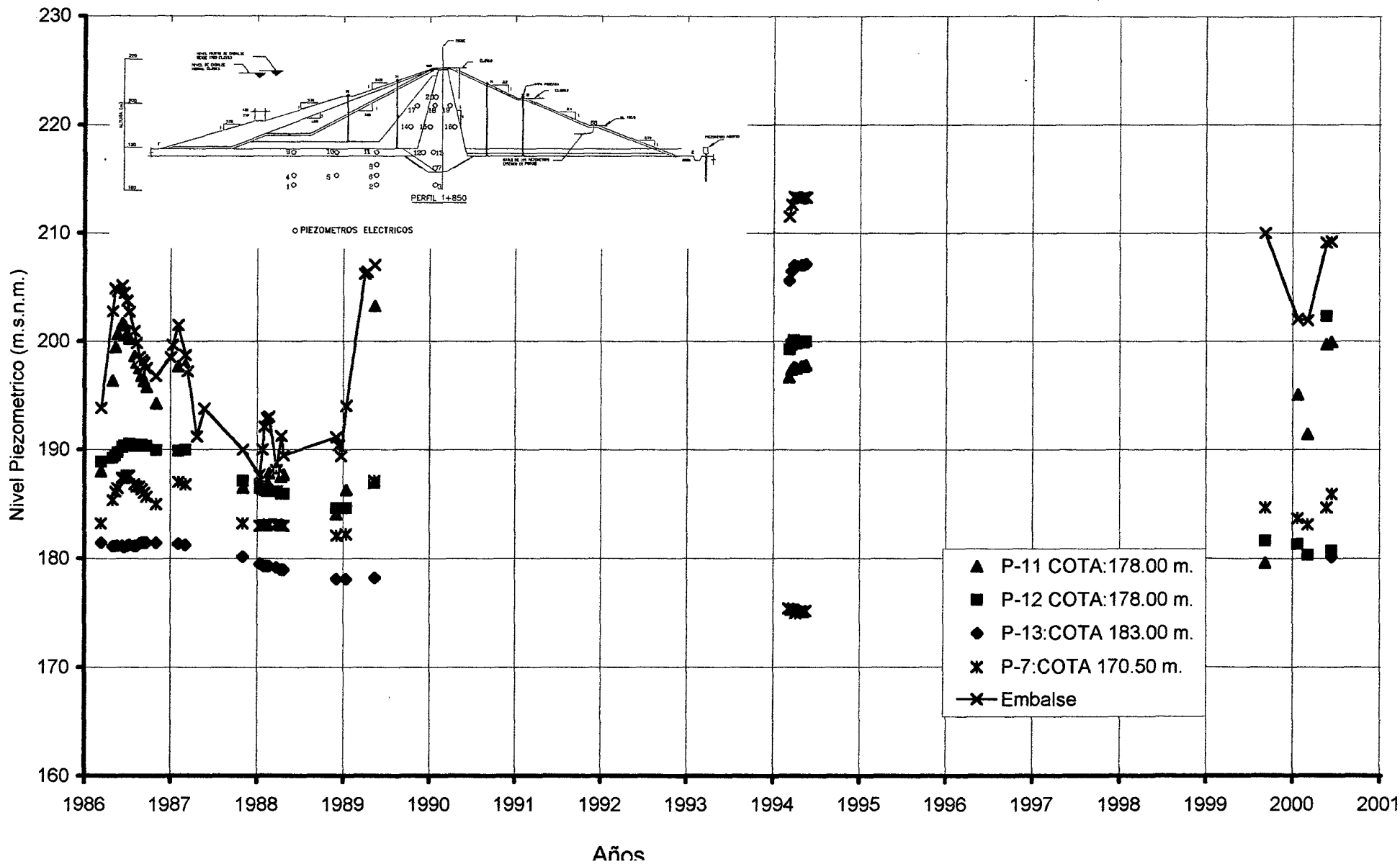




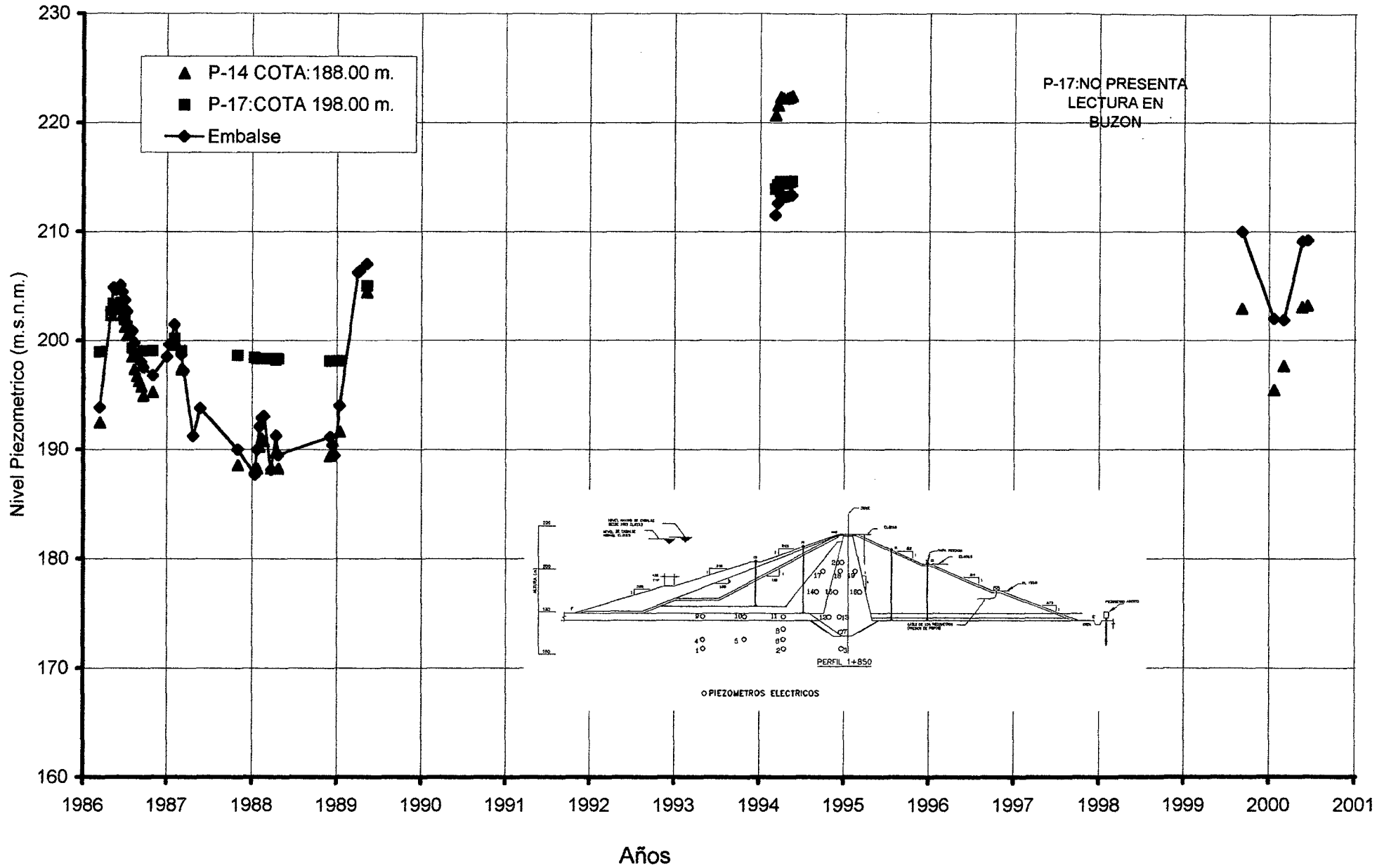
**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-O: PIEZÓMETROS EN EL BLANKET DE IMPERMEABILIZACION**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 1+850)**



**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-P: PIEZÓMETROS EN LA PARTE INFERIOR DEL NUCLEO IMPERMEABLE**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 1+850)**

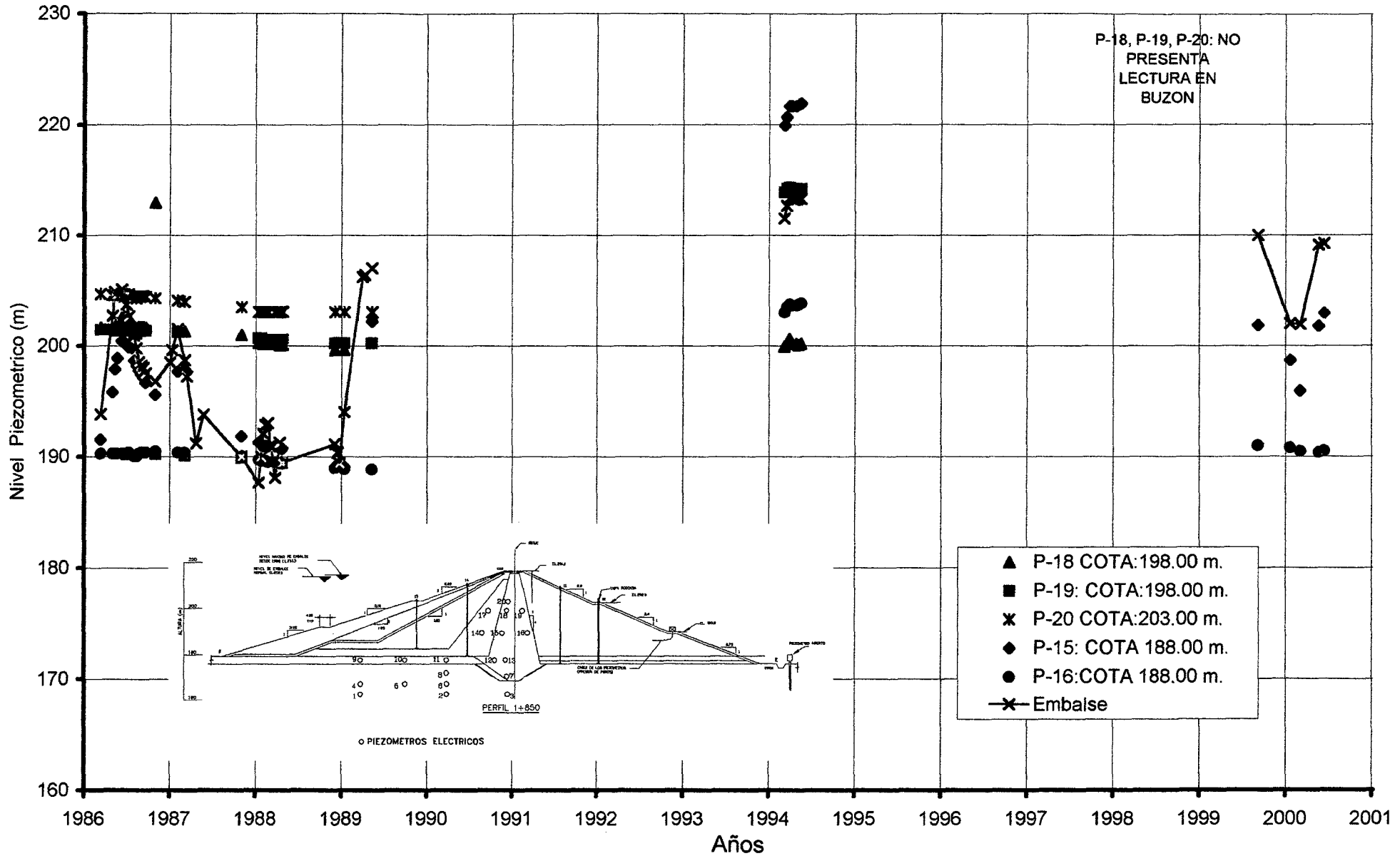


ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
 LAMINA 5.15-Q: PIEZÓMETROS EN EL CUERPO DE LA PRESA  
 PRESA TINAJONES(SECCIÓN 1+850)





**ANALISIS DE INFILTRACION EN ESTRUCTURAS DE TIERRA**  
**LAMINA 5.15-R: PIEZÓMETROS EN LA PARTE SUPERIOR DEL NUCLEO**  
**PRESA TINAJONES(SECCIÓN 1+850)**



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **13-Mar-86**  
Cota de emb 193.84 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm <sup>2</sup>	m-H <sub>2</sub> O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm <sup>2</sup>	m-H <sub>2</sub> O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	260	1.07	202.23	2.02	20.22	186.72	96%
2	166.50	466	209	0.93	239.01	2.39	23.90	190.40	98%
3	166.50	448	184	0.91	240.24	2.40	24.02	190.52	98%
4	171.00	460	297	1.09	177.67	1.78	17.77	188.77	97%
5	171.00	458	262	1.03	201.88	2.02	20.19	191.19	99%
6	171.00	431	254	1.13	200.01	2.00	20.00	191.00	99%
7	172.50	450	275	1.03	180.25	1.80	18.03	190.53	98%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	325	0.96	108.48	1.08	10.85	193.85	100%
10	183.00	439	342	1.11	107.67	1.08	10.77	193.77	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	321	1.10	128.70	1.29	12.87	195.87	101%
13	183.00	438	372	0.99	65.34	0.65	6.53	189.53	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	282	0.99	160.38	1.60	16.04	204.04	105%
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	101%
17	198.00	447	439	1.11	8.88	0.09	0.89	198.89	103%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	421	1.06	18.02	0.18	1.80	204.80	106%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm <sup>2</sup>	m-H <sub>2</sub> O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	329	2.08	301.60	3.02	30.16	191.66	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	382	2.11	217.33	2.17	21.73	183.23	95%
4	166.50	475	355	2.16	259.20	2.59	25.92	192.42	99%
5	166.50	480	365	2.21	254.15	2.54	25.42	191.92	99%
6	166.50	470	424	2.24	103.04	1.03	10.30	176.80	91%
7	169.00	442	315	1.12	142.24	1.42	14.22	183.22	95%
8	173.50	463	283	1.09	196.20	1.96	19.62	193.12	100%
9	178.00	445	339	1.10	116.60	1.17	11.66	189.66	98%
10	178.00	440	334	1.00	106.00	1.06	10.60	188.60	97%
11	178.00	442	343	1.01	99.99	1.00	10.00	188.00	97%
12	178.00	446	347	1.10	108.90	1.09	10.89	188.89	97%
13	178.00	432	400	1.08	34.56	0.35	3.46	181.46	94%
14	188.00	452	410	1.06	44.52	0.45	4.45	192.45	99%
15	188.00	442	410	1.10	35.20	0.35	3.52	191.52	99%
16	188.00	421	400	1.08	22.68	0.23	2.27	190.27	98%
17	198.00	453	444	1.00	9.00	0.09	0.90	198.90	103%
18	198.00	441	409	1.14	36.48	0.36	3.65	201.65	104%
19	198.00	404	373	1.11	34.41	0.34	3.44	201.44	104%
20	203.00	446	429	1.01	17.17	0.17	1.72	204.72	106%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **11-Jun-86**  
Cota de emb 205.13 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	194	1.31	298.68	2.99	29.87	199.37	97%
2	169.50	416	140	1.20	331.20	3.31	33.12	202.62	99%
3	169.50	438	188	1.17	292.50	2.93	29.25	198.75	97%
4	174.50	415	191	1.23	275.52	2.76	27.55	202.05	98%
5	174.50	427	201	1.22	275.72	2.76	27.57	202.07	99%
6	174.50	466	302	1.17	191.88	1.92	19.19	193.69	94%
7	175.50	441	328	1.10	124.30	1.24	12.43	187.93	92%
8	179.50	445	247	1.22	241.56	2.42	24.16	203.66	99%
9	186.00	450	280	1.11	188.70	1.89	18.87	204.87	100%
10	186.00	432	271	1.21	194.81	1.95	19.48	205.48	100%
11	186.00	468	321	1.22	179.34	1.79	17.93	203.93	99%
12	186.00	450	349	1.15	116.15	1.16	11.62	197.62	96%
13	186.00	430	357	1.01	73.73	0.74	7.37	193.37	94%
14	191.00	449	298	0.95	143.45	1.43	14.35	205.35	100%
15	191.00	441	321	0.99	118.80	1.19	11.88	202.88	99%
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	413	1.13	37.29	0.37	3.73	204.73	100%
19	201.00	420	401	1.00	19.00	0.19	1.90	202.90	99%
20	206.00	437	417	1.13	22.60	0.23	2.26	208.26	102%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+850</b>									
1	166.50	449	193	1.07	273.92	2.74	27.39	193.89	95%
2	166.50	466	97	0.93	343.17	3.43	34.32	200.82	98%
3	166.50	448	92	0.91	323.96	3.24	32.40	198.90	97%
4	171.00	460	199	1.09	284.49	2.84	28.45	199.45	97%
5	171.00	458	160	1.03	306.94	3.07	30.69	201.69	98%
6	171.00	431	164	1.13	301.71	3.02	30.17	201.17	98%
7	172.50	450	216	1.03	241.02	2.41	24.10	196.60	96%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	213	0.96	216.00	2.16	21.60	204.60	100%
10	183.00	439	246	1.11	214.23	2.14	21.42	204.42	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	321	1.10	128.70	1.29	12.87	195.87	95%
13	183.00	438	373	0.99	64.35	0.64	6.44	189.44	92%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	282	0.99	160.38	1.60	16.04	204.04	99%
16	188.00	442	363	1.09	86.11	0.86	8.61	196.61	96%
17	198.00	447	380	1.11	74.37	0.74	7.44	205.44	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	421	1.06	18.02	0.18	1.80	204.80	100%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>1+850</b>									
1	161.50	474	278	2.08	407.68	4.08	40.77	202.27	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	342	2.11	301.73	3.02	30.17	191.67	93%
4	166.50	475	306	2.16	365.04	3.65	36.50	203.00	99%
5	166.50	480	317	2.21	360.23	3.60	36.02	202.52	99%
6	166.50	470	418	2.24	116.48	1.16	11.65	178.15	87%
7	169.00	442	278	1.12	183.68	1.84	18.37	187.37	91%
8	173.50	463	185	1.09	303.02	3.03	30.30	203.80	99%
9	178.00	445	226	1.10	240.90	2.41	24.09	202.09	99%
10	178.00	440	199	1.00	241.00	2.41	24.10	202.10	99%
11	178.00	442	208	1.01	236.34	2.36	23.63	201.63	98%
12	178.00	446	335	1.10	122.10	1.22	12.21	190.21	93%
13	178.00	432	403	1.08	31.32	0.31	3.13	181.13	88%
14	188.00	452	310	1.06	150.52	1.51	15.05	203.05	99%
15	188.00	442	329	1.10	124.30	1.24	12.43	200.43	98%
16	188.00	421	400	1.08	22.68	0.23	2.27	190.27	93%
17	198.00	453	398	1.00	55.00	0.55	5.50	203.50	99%
18	198.00	441	401	1.14	45.60	0.46	4.56	202.56	99%
19	198.00	404	373	1.11	34.41	0.34	3.44	201.44	98%
20	203.00	446	429	1.01	17.17	0.17	1.72	204.72	100%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **20-Jun-86**  
 Cota de emb 204.48 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	147	1.31	360.25	3.60	36.03	205.53	101%
2	169.50	416	197	1.20	262.80	2.63	26.28	195.78	96%
3	169.50	438	206	1.17	271.44	2.71	27.14	196.64	96%
4	174.50	415	306	1.23	134.07	1.34	13.41	187.91	92%
5	174.50	427	323	1.22	126.88	1.27	12.69	187.19	92%
6	174.50	466	254	1.17	248.04	2.48	24.80	199.30	97%
7	175.50	441	287	1.10	169.40	1.69	16.94	192.44	94%
8	179.50	445	276	1.22	206.18	2.06	20.62	200.12	98%
9	186.00	450	328	1.11	135.42	1.35	13.54	199.54	98%
10	186.00	432	350	1.21	99.22	0.99	9.92	195.92	96%
11	186.00	468	359	1.22	132.98	1.33	13.30	199.30	97%
12	186.00	450	306	1.15	165.60	1.66	16.56	202.56	99%
13	186.00	430	323	1.01	108.07	1.08	10.81	196.81	96%
14	191.00	449	371	0.95	74.10	0.74	7.41	198.41	97%
15	191.00	441	321	0.99	118.80	1.19	11.88	202.88	99%
16	191.00	470	412	1.09	63.22	0.63	6.32	197.32	96%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	403	1.13	48.59	0.49	4.86	205.86	101%
19	201.00	420	417	1.00	3.00	0.03	0.30	201.30	98%
20	206.00	437	410	1.13	30.51	0.31	3.05	209.05	102%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+850</b>									
1	166.50	449	203	1.07	263.22	2.63	26.32	192.82	94%
2	166.50	466	106	0.93	334.80	3.35	33.48	199.98	98%
3	166.50	448	100	0.91	316.68	3.17	31.67	198.17	97%
4	171.00	460	207	1.09	275.77	2.76	27.58	198.58	97%
5	171.00	458	167	1.03	299.73	3.00	29.97	200.97	98%
6	171.00	431	171	1.13	293.80	2.94	29.38	200.38	98%
7	172.50	450	217	1.03	239.99	2.40	24.00	196.50	96%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	221	0.96	208.32	2.08	20.83	203.83	100%
10	183.00	439	253	1.11	206.46	2.06	20.65	203.65	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	321	1.10	128.70	1.29	12.87	195.87	96%
13	183.00	438	272	0.99	164.34	1.64	16.43	199.43	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	283	0.99	159.39	1.59	15.94	203.94	100%
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	96%
17	198.00	447	388	1.11	65.49	0.65	6.55	204.55	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	421	1.06	18.02	0.18	1.80	204.80	100%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>1+850</b>									
1	161.50	474	283	2.08	397.28	3.97	39.73	201.23	98%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	342	2.11	301.73	3.02	30.17	191.67	94%
4	166.50	475	310	2.16	356.40	3.56	35.64	202.14	99%
5	166.50	480	321	2.21	351.39	3.51	35.14	201.64	99%
6	166.50	470	424	2.24	103.04	1.03	10.30	176.80	86%
7	169.00	442	278	1.12	183.68	1.84	18.37	187.37	92%
8	173.50	463	193	1.09	294.30	2.94	29.43	202.93	99%
9	178.00	445	233	1.10	233.20	2.33	23.32	201.32	98%
10	178.00	440	205	1.00	235.00	2.35	23.50	201.50	99%
11	178.00	442	210	1.01	234.32	2.34	23.43	201.43	99%
12	178.00	446	334	1.10	123.20	1.23	12.32	190.32	93%
13	178.00	432	404	1.08	30.24	0.30	3.02	181.02	89%
14	188.00	452	317	1.06	143.10	1.43	14.31	202.31	99%
15	188.00	442	330	1.10	123.20	1.23	12.32	200.32	98%
16	188.00	421	400	1.08	22.68	0.23	2.27	190.27	93%
17	198.00	453	405	1.00	48.00	0.48	4.80	202.80	99%
18	198.00	441	403	1.14	43.32	0.43	4.33	202.33	99%
19	198.00	404	374	1.11	33.30	0.33	3.33	201.33	98%
20	203.00	446	430	1.01	16.16	0.16	1.62	204.62	100%

**Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones**

Fecha: **01-Jul-86**

Cota de emb 203.75 ms.n.m

Cota de Referencia 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	208	1.31	280.34	2.80	28.03	197.53	97%
2	169.50	416	155	1.20	313.20	3.13	31.32	200.82	99%
3	169.50	438	199	1.17	279.63	2.80	27.96	197.46	97%
4	174.50	415	205	1.23	258.30	2.58	25.83	200.33	98%
5	174.50	427	215	1.22	258.64	2.59	25.86	200.36	98%
6	174.50	466	315	1.17	176.67	1.77	17.67	192.17	94%
7	175.50	441	319	1.10	134.20	1.34	13.42	188.92	93%
8	179.50	445	362	1.22	101.26	1.01	10.13	189.63	93%
9	186.00	450	297	1.11	169.83	1.70	16.98	202.98	100%
10	186.00	432	282	1.21	181.50	1.82	18.15	204.15	100%
11	186.00	468	337	1.22	159.82	1.60	15.98	201.98	99%
12	186.00	450	349	1.15	116.15	1.16	11.62	197.62	97%
13	186.00	430	359	1.01	71.71	0.72	7.17	193.17	95%
14	191.00	449	317	0.95	125.40	1.25	12.54	203.54	100%
15	191.00	441	322	0.99	117.81	1.18	11.78	202.78	100%
16	191.00	470	370	1.09	109.00	1.09	10.90	201.90	99%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	412	1.13	38.42	0.38	3.84	204.84	101%
19	201.00	420	403	1.00	17.00	0.17	1.70	202.70	99%
20	206.00	437	417	1.13	22.60	0.23	2.26	208.26	102%

**0+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	213	1.07	252.52	2.53	25.25	191.75	94%
2	166.50	466	117	0.93	324.57	3.25	32.46	198.96	98%
3	166.50	448	109	0.91	308.49	3.08	30.85	197.35	97%
4	171.00	460	216	1.09	265.96	2.66	26.60	197.60	97%
5	171.00	458	177	1.03	289.43	2.89	28.94	199.94	98%
6	171.00	431	180	1.13	283.63	2.84	28.36	199.36	98%
7	172.50	450	219	1.03	237.93	2.38	23.79	196.29	96%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	232	0.96	197.76	1.98	19.78	202.78	100%
10	183.00	439	242	1.11	218.67	2.19	21.87	204.87	101%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	319	1.10	130.90	1.31	13.09	196.09	96%
13	183.00	438	373	0.99	64.35	0.64	6.44	189.44	93%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	283	0.99	159.39	1.59	15.94	203.94	100%
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	96%
17	198.00	447	397	1.11	55.50	0.56	5.55	203.55	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	100%

**1+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	287	2.08	388.96	3.89	38.90	200.40	98%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	343	2.11	299.62	3.00	29.96	191.46	94%
4	166.50	475	314	2.16	347.76	3.48	34.78	201.28	99%
5	166.50	480	325	2.21	342.55	3.43	34.26	200.76	99%
6	166.50	470	430	2.24	89.60	0.90	8.96	175.46	86%
7	169.00	442	276	1.12	185.92	1.86	18.59	187.59	92%
8	173.50	463	202	1.09	284.49	2.84	28.45	201.95	99%
9	178.00	445	241	1.10	224.40	2.24	22.44	200.44	98%
10	178.00	440	215	1.00	225.00	2.25	22.50	200.50	98%
11	178.00	442	218	1.01	226.24	2.26	22.62	200.62	98%
12	178.00	446	334	1.10	123.20	1.23	12.32	190.32	93%
13	178.00	432	403	1.08	31.32	0.31	3.13	181.13	89%
14	188.00	452	327	1.06	132.50	1.33	13.25	201.25	99%
15	188.00	442	332	1.10	121.00	1.21	12.10	200.10	98%
16	188.00	421	400	1.08	22.68	0.23	2.27	190.27	93%
17	198.00	453	414	1.00	39.00	0.39	3.90	201.90	99%
18	198.00	441	402	1.14	44.46	0.44	4.45	202.45	99%
19	198.00	404	474	1.11	-77.70	-0.78	-7.77	190.23	93%
20	203.00	446	430	1.01	16.16	0.16	1.62	204.62	100%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **11-Jul-86**  
 Cota de emb 202.71 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion 0+350	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
1	169.50	422	213	1.31	273.79	2.74	27.38	196.88	97%
2	169.50	416	159	1.20	308.40	3.08	30.84	200.34	99%
3	169.50	438	203	1.17	274.95	2.75	27.50	197.00	97%
4	174.50	415	210	1.23	252.15	2.52	25.22	199.72	99%
5	174.50	427	217	1.22	256.20	2.56	25.62	200.12	99%
6	174.50	466	317	1.17	174.33	1.74	17.43	191.93	95%
7	175.50	441	316	1.10	137.50	1.38	13.75	189.25	93%
8	179.50	445	268	1.22	215.94	2.16	21.59	201.09	99%
9	186.00	450	303	1.11	163.17	1.63	16.32	202.32	100%
10	186.00	432	285	1.21	177.87	1.78	17.79	203.79	101%
11	186.00	468	339	1.22	157.38	1.57	15.74	201.74	100%
12	186.00	450	349	1.15	116.15	1.16	11.62	197.62	97%
13	186.00	430	359	1.01	71.71	0.72	7.17	193.17	95%
14	191.00	449	318	0.95	124.45	1.24	12.45	203.45	100%
15	191.00	441	320	0.99	119.79	1.20	11.98	202.98	100%
16	191.00	470	369	1.09	110.09	1.10	11.01	202.01	100%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	410	1.13	40.68	0.41	4.07	205.07	101%
19	201.00	420	401	1.00	19.00	0.19	1.90	202.90	100%
20	206.00	437	416	1.13	23.73	0.24	2.37	208.37	103%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	220	1.07	245.03	2.45	24.50	191.00	94%
2	166.50	466	124	0.93	318.06	3.18	31.81	198.31	98%
3	166.50	448	116	0.91	302.12	3.02	30.21	196.71	97%
4	171.00	460	223	1.09	258.33	2.58	25.83	196.83	97%
5	171.00	458	184	1.03	282.22	2.82	28.22	199.22	98%
6	171.00	431	185	1.13	277.98	2.78	27.80	198.80	98%
7	172.50	450	219	1.03	237.93	2.38	23.79	196.29	97%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	240	0.96	190.08	1.90	19.01	202.01	100%
10	183.00	439	269	1.11	188.70	1.89	18.87	201.87	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	317	1.10	133.10	1.33	13.31	196.31	97%
13	183.00	438	372	0.99	65.34	0.65	6.53	189.53	94%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	283	0.99	159.39	1.59	15.94	203.94	101%
16	188.00	442	362	1.09	87.20	0.87	8.72	196.72	97%
17	198.00	447	403	1.11	48.84	0.49	4.88	202.88	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	420	1.06	19.08	0.19	1.91	204.91	101%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	289	2.08	384.80	3.85	38.48	199.98	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	343	2.11	299.62	3.00	29.96	191.46	94%
4	166.50	475	318	2.16	339.12	3.39	33.91	200.41	99%
5	166.50	480	328	2.21	335.92	3.36	33.59	200.09	99%
6	166.50	470	433	2.24	82.88	0.83	8.29	174.79	86%
7	169.00	442	276	1.12	185.92	1.86	18.59	187.59	93%
8	173.50	463	208	1.09	277.95	2.78	27.80	201.30	99%
9	178.00	445	248	1.10	216.70	2.17	21.67	199.67	99%
10	178.00	440	221	1.00	219.00	2.19	21.90	199.90	99%
11	178.00	442	222	1.01	222.20	2.22	22.22	200.22	99%
12	178.00	446	332	1.10	125.40	1.25	12.54	190.54	94%
13	178.00	432	402	1.08	32.40	0.32	3.24	181.24	89%
14	188.00	452	334	1.06	125.08	1.25	12.51	200.51	99%
15	188.00	442	334	1.10	118.80	1.19	11.88	199.88	99%
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	94%
17	198.00	453	420	1.00	33.00	0.33	3.30	201.30	99%
18	198.00	441	402	1.14	44.46	0.44	4.45	202.45	100%
19	198.00	404	373	1.11	34.41	0.34	3.44	201.44	99%
20	203.00	446	429	1.01	17.17	0.17	1.72	204.72	101%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **02-Ago-86**  
Cota de emb 200.92 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	230	1.31	251.52	2.52	25.15	194.65	97%
2	169.50	416	178	1.20	285.60	2.86	28.56	198.06	99%
3	169.50	438	219	1.17	256.23	2.56	25.62	195.12	97%
4	174.50	415	228	1.23	230.01	2.30	23.00	197.50	98%
5	174.50	427	237	1.22	231.80	2.32	23.18	197.68	98%
6	174.50	466	332	1.17	156.78	1.57	15.68	190.18	95%
7	175.50	441	321	1.10	132.00	1.32	13.20	188.70	94%
8	179.50	445	385	1.22	73.20	0.73	7.32	186.82	93%
9	186.00	450	321	1.11	143.19	1.43	14.32	200.32	100%
10	186.00	432	296	1.21	164.56	1.65	16.46	202.46	101%
11	186.00	468	360	1.22	131.76	1.32	13.18	199.18	99%
12	186.00	450	349	1.15	116.15	1.16	11.62	197.62	98%
13	186.00	430	362	1.01	68.68	0.69	6.87	192.87	96%
14	191.00	449	345	0.95	98.80	0.99	9.88	200.88	100%
15	191.00	441	323	0.99	116.82	1.17	11.68	202.68	101%
16	191.00	470	372	1.09	106.82	1.07	10.68	201.68	100%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	415	1.13	35.03	0.35	3.50	204.50	102%
19	201.00	420	405	1.00	15.00	0.15	1.50	202.50	101%
20	206.00	437	420	1.13	19.21	0.19	1.92	207.92	103%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.
<b>0+850</b>									
1	166.50	449	240	1.07	223.63	2.24	22.36	188.86	94%
2	166.50	466	146	0.93	297.60	2.98	29.76	196.26	98%
3	166.50	448	136	0.91	283.92	2.84	28.39	194.89	97%
4	171.00	460	241	1.09	238.71	2.39	23.87	194.87	97%
5	171.00	458	203	1.03	262.65	2.63	26.27	197.27	98%
6	171.00	431	203	1.13	257.64	2.58	25.76	196.76	98%
7	172.50	450	228	1.03	228.66	2.29	22.87	195.37	97%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	261	0.96	169.92	1.70	16.99	199.99	100%
10	183.00	439	287	1.11	168.72	1.69	16.87	199.87	99%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	319	1.10	130.90	1.31	13.09	196.09	98%
13	183.00	438	376	0.99	61.38	0.61	6.14	189.14	94%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	285	0.99	157.41	1.57	15.74	203.74	101%
16	188.00	442	366	1.09	82.84	0.83	8.28	196.28	98%
17	198.00	447	421	1.11	28.86	0.29	2.89	200.89	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	423	1.06	15.90	0.16	1.59	204.59	102%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.
<b>1+850</b>									
1	161.50	474	301	2.08	359.84	3.60	35.98	197.48	98%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	349	2.11	286.96	2.87	28.70	190.20	95%
4	166.50	475	328	2.16	317.52	3.18	31.75	198.25	99%
5	166.50	480	339	2.21	311.61	3.12	31.16	197.66	98%
6	166.50	470	442	2.24	62.72	0.63	6.27	172.77	86%
7	169.00	442	283	1.12	178.08	1.78	17.81	186.81	93%
8	173.50	463	227	1.09	257.24	2.57	25.72	199.22	99%
9	178.00	445	265	1.10	198.00	1.98	19.80	197.80	98%
10	178.00	440	241	1.00	199.00	1.99	19.90	197.90	98%
11	178.00	442	238	1.01	206.04	2.06	20.60	198.60	99%
12	178.00	446	334	1.10	123.20	1.23	12.32	190.32	95%
13	178.00	432	403	1.08	31.32	0.31	3.13	181.13	90%
14	188.00	452	353	1.06	104.94	1.05	10.49	198.49	99%
15	188.00	442	345	1.10	106.70	1.07	10.67	198.67	99%
16	188.00	421	402	1.08	20.52	0.21	2.05	190.05	95%
17	198.00	453	440	1.00	13.00	0.13	1.30	199.30	99%
18	198.00	441	408	1.14	37.62	0.38	3.76	201.76	100%
19	198.00	404	376	1.11	31.08	0.31	3.11	201.11	100%
20	203.00	446	432	1.01	14.14	0.14	1.41	204.41	102%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **22-Ago-86**  
 Cota de emb 198.53 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	244	1.31	233.18	2.33	23.32	192.82	97%
2	169.50	416	192	1.20	268.80	2.69	26.88	196.38	99%
3	169.50	438	230	1.17	243.36	2.43	24.34	193.84	98%
4	174.50	415	242	1.23	212.79	2.13	21.28	195.78	99%
5	174.50	427	251	1.22	214.72	2.15	21.47	195.97	99%
6	174.50	466	350	1.17	135.72	1.36	13.57	188.07	95%
7	175.50	441	352	1.10	97.90	0.98	9.79	185.29	93%
8	179.50	445	299	1.22	178.12	1.78	17.81	197.31	99%
9	186.00	450	337	1.11	125.43	1.25	12.54	198.54	100%
10	186.00	432	300	1.21	159.72	1.60	15.97	201.97	102%
11	186.00	468	362	1.22	129.32	1.29	12.93	198.93	100%
12	186.00	450	350	1.15	115.00	1.15	11.50	197.50	99%
13	186.00	430	364	1.01	66.66	0.67	6.67	192.67	97%
14	191.00	449	357	0.95	87.40	0.87	8.74	199.74	101%
15	191.00	441	323	0.99	116.82	1.17	11.68	202.68	102%
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	102%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	413	1.13	37.29	0.37	3.73	204.73	103%
19	201.00	420	403	1.00	17.00	0.17	1.70	202.70	102%
20	206.00	437	418	1.13	21.47	0.21	2.15	208.15	105%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	255	1.07	207.58	2.08	20.76	187.26	94%
2	166.50	466	164	0.93	280.86	2.81	28.09	194.59	98%
3	166.50	448	152	0.91	269.36	2.69	26.94	193.44	97%
4	171.00	460	258	1.09	220.18	2.20	22.02	193.02	97%
5	171.00	458	221	1.03	244.11	2.44	24.41	195.41	98%
6	171.00	431	218	1.13	240.69	2.41	24.07	195.07	98%
7	172.50	450	233	1.03	223.51	2.24	22.35	194.85	98%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	280	0.96	151.68	1.52	15.17	198.17	100%
10	183.00	439	303	1.11	150.96	1.51	15.10	198.10	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	315	1.10	135.30	1.35	13.53	196.53	99%
13	183.00	438	374	0.99	63.36	0.63	6.34	189.34	95%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	284	0.99	158.40	1.58	15.84	203.84	103%
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	99%
17	198.00	447	434	1.11	14.43	0.14	1.44	199.44	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	103%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	308	2.08	345.28	3.45	34.53	196.03	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	354	2.11	276.41	2.76	27.64	189.14	95%
4	166.50	475	335	2.16	302.40	3.02	30.24	196.74	99%
5	166.50	480	346	2.21	296.14	2.96	29.61	196.11	99%
6	166.50	470	446	2.24	53.76	0.54	5.38	171.88	87%
7	169.00	442	285	1.12	175.84	1.76	17.58	186.58	94%
8	173.50	463	243	1.09	239.80	2.40	23.98	197.48	99%
9	178.00	445	224	1.10	243.10	2.43	24.31	202.31	102%
10	178.00	440	251	1.00	189.00	1.89	18.90	196.90	99%
11	178.00	442	249	1.01	194.93	1.95	19.49	197.49	99%
12	178.00	446	333	1.10	124.30	1.24	12.43	190.43	96%
13	178.00	432	401	1.08	33.48	0.33	3.35	181.35	91%
14	188.00	452	370	1.06	86.92	0.87	8.69	196.69	99%
15	188.00	442	353	1.10	97.90	0.98	9.79	197.79	100%
16	188.00	421	400	1.08	22.68	0.23	2.27	190.27	96%
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	100%
18	198.00	441	408	1.14	37.62	0.38	3.76	201.76	102%
19	198.00	404	374	1.11	33.30	0.33	3.33	201.33	101%
20	203.00	446	431	1.01	15.15	0.15	1.52	204.52	103%



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **01-Sep-86**  
Cota de emb 198.2 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	248	1.31	227.94	2.28	22.79	192.29	97%
2	169.50	416	196	1.20	264.00	2.64	26.40	195.90	99%
3	169.50	438	232	1.17	241.02	2.41	24.10	193.60	98%
4	174.50	415	245	1.23	209.10	2.09	20.91	195.41	99%
5	174.50	427	256	1.22	208.62	2.09	20.86	195.36	99%
6	174.50	466	356	1.17	128.70	1.29	12.87	187.37	95%
7	175.50	441	323	1.10	129.80	1.30	12.98	188.48	95%
8	179.50	445	302	1.22	174.46	1.74	17.45	196.95	99%
9	186.00	450	341	1.11	120.99	1.21	12.10	198.10	100%
10	186.00	432	302	1.21	157.30	1.57	15.73	201.73	102%
11	186.00	468	378	1.22	109.80	1.10	10.98	196.98	99%
12	186.00	450	344	1.15	121.90	1.22	12.19	198.19	100%
13	186.00	430	361	1.01	69.69	0.70	6.97	192.97	97%
14	191.00	449	368	0.95	76.95	0.77	7.70	198.70	100%
15	191.00	441	321	0.99	118.80	1.19	11.88	202.88	102%
16	191.00	470	370	1.09	109.00	1.09	10.90	201.90	102%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	413	1.13	37.29	0.37	3.73	204.73	103%
19	201.00	420	403	1.00	17.00	0.17	1.70	202.70	102%
20	206.00	437	418	1.13	21.47	0.21	2.15	208.15	105%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	257	1.07	205.44	2.05	20.54	187.04	94%
2	166.50	466	169	0.93	276.21	2.76	27.62	194.12	98%
3	166.50	448	156	0.91	265.72	2.66	26.57	193.07	97%
4	171.00	460	262	1.09	215.82	2.16	21.58	192.58	97%
5	171.00	458	225	1.03	239.99	2.40	24.00	195.00	98%
6	171.00	431	222	1.13	236.17	2.36	23.62	194.62	98%
7	172.50	450	235	1.03	221.45	2.21	22.15	194.65	98%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	284	0.96	147.84	1.48	14.78	197.78	100%
10	183.00	439	307	1.11	146.52	1.47	14.65	197.65	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	315	1.10	135.30	1.35	13.53	196.53	99%
13	183.00	438	375	0.99	62.37	0.62	6.24	189.24	95%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	284	0.99	158.40	1.58	15.84	203.84	103%
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	99%
17	198.00	447	437	1.11	11.10	0.11	1.11	199.11	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	103%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	310	2.08	341.12	3.41	34.11	195.61	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	356	2.11	272.19	2.72	27.22	188.72	95%
4	166.50	475	338	1.16	158.92	1.59	15.89	182.39	92%
5	166.50	480	348	2.21	291.72	2.92	29.17	195.67	99%
6	166.50	470	445	2.24	56.00	0.56	5.60	172.10	87%
7	169.00	442	287	1.12	173.60	1.74	17.36	186.36	94%
8	173.50	463	248	1.09	234.35	2.34	23.44	196.94	99%
9	178.00	445	278	1.10	183.70	1.84	18.37	196.37	99%
10	178.00	440	255	1.00	185.00	1.85	18.50	196.50	99%
11	178.00	442	256	1.01	187.86	1.88	18.79	196.79	99%
12	178.00	446	333	1.10	124.30	1.24	12.43	190.43	96%
13	178.00	432	400	1.08	34.56	0.35	3.46	181.46	92%
14	188.00	452	374	1.06	82.68	0.83	8.27	196.27	99%
15	188.00	442	356	1.10	94.60	0.95	9.46	197.46	100%
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	96%
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	100%
18	198.00	441	408	1.14	37.62	0.38	3.76	201.76	102%
19	198.00	404	374	1.11	33.30	0.33	3.33	201.33	102%
20	203.00	446	431	1.01	15.15	0.15	1.52	204.52	103%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **11-Sep-86**  
Cota de emb 198 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	252	1.31	222.70	2.23	22.27	191.77	97%
2	169.50	416	200	1.20	259.20	2.59	25.92	195.42	99%
3	169.50	438	235	1.17	237.51	2.38	23.75	193.25	98%
4	174.50	415	249	1.23	204.18	2.04	20.42	194.92	98%
5	174.50	427	259	1.22	204.96	2.05	20.50	195.00	98%
6	174.50	466	359	1.17	125.19	1.25	12.52	187.02	94%
7	175.50	441	325	1.10	127.60	1.28	12.76	188.26	95%
8	179.50	445	307	1.22	168.36	1.68	16.84	196.34	99%
9	186.00	450	346	1.11	115.44	1.15	11.54	197.54	100%
10	186.00	432	304	1.21	154.88	1.55	15.49	201.49	102%
11	186.00	468	380	1.22	107.36	1.07	10.74	196.74	99%
12	186.00	450	346	1.15	119.60	1.20	11.96	197.96	100%
13	186.00	430	361	1.01	69.69	0.70	6.97	192.97	97%
14	191.00	449	373	0.95	72.20	0.72	7.22	198.22	100%
15	191.00	441	321	0.99	118.80	1.19	11.88	202.88	102%
16	191.00	470	370	1.09	109.00	1.09	10.90	201.90	102%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	414	1.13	36.16	0.36	3.62	204.62	103%
19	201.00	420	403	1.00	17.00	0.17	1.70	202.70	102%
20	206.00	437	418	1.13	21.47	0.21	2.15	208.15	105%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	261	1.07	201.16	2.01	20.12	186.62	94%
2	166.50	466	175	0.93	270.63	2.71	27.06	193.56	98%
3	166.50	448	161	0.91	261.17	2.61	26.12	192.62	97%
4	171.00	460	267	1.09	210.37	2.10	21.04	192.04	97%
5	171.00	458	230	1.03	234.84	2.35	23.48	194.48	98%
6	171.00	431	226	1.13	231.65	2.32	23.17	194.17	98%
7	172.50	450	237	1.03	219.39	2.19	21.94	194.44	98%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	290	0.96	142.08	1.42	14.21	197.21	100%
10	183.00	439	312	1.11	140.97	1.41	14.10	197.10	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	315	1.10	135.30	1.35	13.53	196.53	99%
13	183.00	438	375	0.99	62.37	0.62	6.24	189.24	96%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	284	0.99	158.40	1.58	15.84	203.84	103%
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	99%
17	198.00	447	438	1.11	9.99	0.10	1.00	199.00	101%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	103%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	313	2.08	334.88	3.35	33.49	194.99	98%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	357	2.11	270.08	2.70	27.01	188.51	95%
4	166.50	475	340	216.00	29160.00	291.60	2916.00	3082.50	1557%
5	166.50	480	350	2.21	287.30	2.87	28.73	195.23	99%
6	166.50	470	445	2.24	56.00	0.56	5.60	172.10	87%
7	169.00	442	290	1.12	170.24	1.70	17.02	186.02	94%
8	173.50	463	252	1.09	229.99	2.30	23.00	196.50	99%
9	178.00	445	282	1.10	179.30	1.79	17.93	195.93	99%
10	178.00	440	259	1.00	181.00	1.81	18.10	196.10	99%
11	178.00	442	261	1.01	182.81	1.83	18.28	196.28	99%
12	178.00	446	334	1.10	123.20	1.23	12.32	190.32	96%
13	178.00	432	400	1.08	34.56	0.35	3.46	181.46	92%
14	188.00	452	379	1.06	77.38	0.77	7.74	195.74	99%
15	188.00	442	359	1.10	91.30	0.91	9.13	197.13	100%
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	96%
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	101%
18	198.00	441	408	1.14	37.62	0.38	3.76	201.76	102%
19	198.00	404	374	1.11	33.30	0.33	3.33	201.33	102%
20	203.00	446	431	1.01	15.15	0.15	1.52	204.52	103%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **21-Sep-86**  
 Cota de emb 197.51 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	259	1.31	213.53	2.14	21.35	190.85	97%	
2	169.50	416	207	1.20	250.80	2.51	25.08	194.58	99%	
3	169.50	438	241	1.17	230.49	2.30	23.05	192.55	97%	
4	174.50	415	256	1.23	195.57	1.96	19.56	194.06	98%	
5	174.50	427	265	1.22	197.64	1.98	19.76	194.26	98%	
6	174.50	466	361	1.17	122.85	1.23	12.29	186.79	95%	
7	175.50	441	327	1.10	125.40	1.25	12.54	188.04	95%	
8	179.50	445	313	1.22	161.04	1.61	16.10	195.60	99%	
9	186.00	450	353	1.11	107.67	1.08	10.77	196.77	100%	
10	186.00	432	307	1.21	151.25	1.51	15.13	201.13	102%	
11	186.00	468	391	1.22	93.94	0.94	9.39	195.39	99%	
12	186.00	450	346	1.15	119.60	1.20	11.96	197.96	100%	
13	186.00	430	361	1.01	69.69	0.70	6.97	192.97	98%	
14	191.00	449	383	0.95	62.70	0.63	6.27	197.27	100%	
15	191.00	441	320	0.99	119.79	1.20	11.98	202.98	103%	
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	102%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	415	1.13	35.03	0.35	3.50	204.50	104%	
19	201.00	420	403	1.00	17.00	0.17	1.70	202.70	103%	
20	206.00	437	418	1.13	21.47	0.21	2.15	208.15	105%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+850</b>										
1	166.50	449	267	1.07	194.74	1.95	19.47	185.97	94%	
2	166.50	466	183	0.93	263.19	2.63	26.32	192.82	98%	
3	166.50	448	169	0.91	253.89	2.54	25.39	191.89	97%	
4	171.00	460	274	1.09	202.74	2.03	20.27	191.27	97%	
5	171.00	458	238	1.03	226.60	2.27	22.66	193.66	98%	
6	171.00	431	233	1.13	223.74	2.24	22.37	193.37	98%	
7	172.50	450	244	1.03	212.18	2.12	21.22	193.72	98%	
8	177.00	445	-	1.15						
9	183.00	438	298	0.96	134.40	1.34	13.44	196.44	99%	
10	183.00	439	319	1.11	133.20	1.33	13.32	196.32	99%	
11	183.00	449	-	1.11						
12	183.00	438	314	1.10	136.40	1.36	13.64	196.64	100%	
13	183.00	438	315	0.99	121.77	1.22	12.18	195.18	99%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	284	0.99	158.40	1.58	15.84	203.84	103%	
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	99%	
17	198.00	447	438	1.11	9.99	0.10	1.00	199.00	101%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	104%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>1+850</b>										
1	161.50	474	317	2.08	326.56	3.27	32.66	194.16	98%	
2	161.50	465	-	1.92						
3	161.50	485	360	2.11	263.75	2.64	26.38	187.88	95%	
4	166.50	475	344	2.16	282.96	2.83	28.30	194.80	99%	
5	166.50	480	354	2.21	278.46	2.78	27.85	194.35	98%	
6	166.50	470	446	2.24	53.76	0.54	5.38	171.88	87%	
7	169.00	442	293	1.12	166.88	1.67	16.69	185.69	94%	
8	173.50	463	260	1.09	221.27	2.21	22.13	195.63	99%	
9	178.00	445	288	1.10	172.70	1.73	17.27	195.27	99%	
10	178.00	440	265	1.00	175.00	1.75	17.50	195.50	99%	
11	178.00	442	266	1.01	177.76	1.78	17.78	195.78	99%	
12	178.00	446	334	1.10	123.20	1.23	12.32	190.32	96%	
13	178.00	432	400	1.08	34.56	0.35	3.46	181.46	92%	
14	188.00	452	387	1.06	68.90	0.69	6.89	194.89	99%	
15	188.00	442	363	1.10	86.90	0.87	8.69	196.69	100%	
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	96%	
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	101%	
18	198.00	441	409	1.14	36.48	0.36	3.65	201.65	102%	
19	198.00	404	374	1.11	33.30	0.33	3.33	201.33	102%	
20	203.00	446	432	1.01	14.14	0.14	1.41	204.41	103%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **01-Nov-86**  
Cota de emb 196.78 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	258	1.31	214.84	2.15	21.48	190.98	97%	
2	169.50	416	206	1.20	252.00	2.52	25.20	194.70	99%	
3	169.50	438	240	1.17	231.66	2.32	23.17	192.67	98%	
4	174.50	415	254	1.23	198.03	1.98	19.80	194.30	99%	
5	174.50	427	264	1.22	198.86	1.99	19.89	194.39	99%	
6	174.50	466	356	1.17	128.70	1.29	12.87	187.37	95%	
7	175.50	441	334	1.10	117.70	1.18	11.77	187.27	95%	
8	179.50	445	312	1.22	162.26	1.62	16.23	195.73	99%	
9	186.00	450	351	1.11	109.89	1.10	10.99	196.99	100%	
10	186.00	432	309	1.21	148.83	1.49	14.88	200.88	102%	
11	186.00	468	389	1.22	96.38	0.96	9.64	195.64	99%	
12	186.00	450	345	1.15	120.75	1.21	12.08	198.08	101%	
13	186.00	430	361	1.01	69.69	0.70	6.97	192.97	98%	
14	191.00	449	383	0.95	62.70	0.63	6.27	197.27	100%	
15	191.00	441	320	0.99	119.79	1.20	11.98	202.98	103%	
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	103%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	419	1.13	30.51	0.31	3.05	204.05	104%	
19	201.00	420	404	1.00	16.00	0.16	1.60	202.60	103%	
20	206.00	437	419	1.13	20.34	0.20	2.03	208.03	106%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	256	1.07	206.51	2.07	20.65	187.15	95%	
2	166.50	466	181	0.93	265.05	2.65	26.51	193.01	98%	
3	166.50	448	167	0.91	255.71	2.56	25.57	192.07	98%	
4	171.00	460	273	1.09	203.83	2.04	20.38	191.38	97%	
5	171.00	458	236	1.03	228.66	2.29	22.87	193.87	99%	
6	171.00	431	232	1.13	224.87	2.25	22.49	193.49	98%	
7	172.50	450	244	1.03	212.18	2.12	21.22	193.72	98%	
8	177.00	445	-	1.15						
9	183.00	438	297	0.96	135.36	1.35	13.54	196.54	100%	
10	183.00	439	317	1.11	135.42	1.35	13.54	196.54	100%	
11	183.00	449	-	1.11						
12	183.00	438	313	1.10	137.50	1.38	13.75	196.75	100%	
13	183.00	438	376	0.99	61.38	0.61	6.14	189.14	96%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	285	0.99	157.41	1.57	15.74	203.74	104%	
16	188.00	442	364	1.09	85.02	0.85	8.50	196.50	100%	
17	198.00	447	439	1.11	8.88	0.09	0.89	198.89	101%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	104%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474	316	2.08	328.64	3.29	32.86	194.36	99%	
2	161.50	465	-	1.92						
3	161.50	485	365	2.11	253.20	2.53	25.32	186.82	95%	
4	166.50	475	343	2.16	285.12	2.85	28.51	195.01	99%	
5	166.50	480	353	2.21	280.67	2.81	28.07	194.57	99%	
6	166.50	470	437	2.24	73.92	0.74	7.39	173.89	88%	
7	169.00	442	299	1.12	160.16	1.60	16.02	185.02	94%	
8	173.50	463	258	1.09	223.45	2.23	22.35	195.85	100%	
9	178.00	445	301	1.10	158.40	1.58	15.84	193.84	99%	
10	178.00	440	278	1.00	162.00	1.62	16.20	194.20	99%	
11	178.00	442	281	1.01	162.61	1.63	16.26	194.26	99%	
12	178.00	446	337	1.10	119.90	1.20	11.99	189.99	97%	
13	178.00	432	400	1.08	34.56	0.35	3.46	181.46	92%	
14	188.00	452	384	1.06	72.08	0.72	7.21	195.21	99%	
15	188.00	442	373	1.10	75.90	0.76	7.59	195.59	99%	
16	188.00	421	398	1.08	24.84	0.25	2.48	190.48	97%	
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	101%	
18	198.00	441	310	1.14	149.34	1.49	14.93	212.93	108%	
19	198.00	404	474	1.11	-77.70	-0.78	-7.77	190.23	97%	
20	203.00	446	433	1.01	13.13	0.13	1.31	204.31	104%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 03-Nov-87

Cota de emb: 190 ms.n.m  
Agua abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	296	1.07	163.71	1.64	16.37	182.87	96%
2	166.50	466	253	0.93	198.09	1.98	19.81	186.31	98%
3	166.50	448	228	0.91	200.20	2.00	20.02	186.52	98%
4	171.00	460	336	1.09	135.16	1.35	13.52	184.52	97%
5	171.00	458	303	1.03	159.65	1.60	15.97	186.97	98%
6	171.00	431	290	1.13	159.33	1.59	15.93	186.93	98%
7	172.50	450	290	1.03	164.80	1.65	16.48	188.98	99%
8	177.00	445	370	1.15	86.25	0.86	8.63	185.63	98%
9	183.00	438	306	0.96	126.72	1.27	12.67	195.67	103%
10	183.00	439	379	1.11	66.60	0.67	6.66	189.66	100%
11	183.00	449	339	1.11	122.10	1.22	12.21	195.21	103%
12	183.00	438	324	1.10	125.40	1.25	12.54	195.54	103%
13	183.00	438	331	0.99	105.93	1.06	10.59	193.59	102%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	256	0.99	186.12	1.86	18.61	206.61	109%
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	103%
17	198.00	447	441	1.11	6.66	0.07	0.67	198.67	105%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	426	1.06	12.72	0.13	1.27	204.27	108%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	350	2.08	257.92	2.58	25.79	187.29	99%
2	161.50	465	336	1.92	247.68	2.48	24.77	186.27	98%
3	161.50	485	394	2.11	192.01	1.92	19.20	180.70	95%
4	166.50	475	376	2.16	213.84	2.14	21.38	187.88	99%
5	166.50	480	335	2.21	320.45	3.20	32.05	198.55	104%
6	166.50	470	434	2.24	80.64	0.81	8.06	174.56	92%
7	169.00	442	315	1.12	142.24	1.42	14.22	183.22	96%
8	173.50	463	321	1.09	154.78	1.55	15.48	188.98	99%
9	178.00	445	370	1.10	82.50	0.83	8.25	186.25	98%
10	178.00	440	357	1.00	83.00	0.83	8.30	186.30	98%
11	178.00	442	358	1.01	84.84	0.85	8.48	186.48	98%
12	178.00	446	363	1.10	91.30	0.91	9.13	187.13	98%
13	178.00	432	412	1.08	21.60	0.22	2.16	180.16	95%
14	188.00	452	447	1.06	5.30	0.05	0.53	188.53	99%
15	188.00	442	407	1.10	38.50	0.39	3.85	191.85	101%
16	188.00	421	402	1.08	20.52	0.21	2.05	190.05	100%
17	198.00	453	447	1.00	6.00	0.06	0.60	198.60	105%
18	198.00	441	415	1.14	29.64	0.30	2.96	200.96	106%
19	198.00	404	477	1.11	-81.03	-0.81	-8.10	189.90	100%
20	203.00	446	441	1.01	5.05	0.05	0.51	203.51	107%

**Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones**

Fecha: **02-Ene-87**

Cota de emb: 198.5 ms.n.m

Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

**0+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	239	1.07	224.70	2.25	22.47	188.97	95%
2	166.50	466	160	0.93	284.58	2.85	28.46	194.96	98%
3	166.50	448	149	0.91	272.09	2.72	27.21	193.71	98%
4	171.00	460	255	1.09	223.45	2.23	22.35	193.35	97%
5	171.00	458	217	1.03	248.23	2.48	24.82	195.82	99%
6	171.00	431	215	1.13	244.08	2.44	24.41	195.41	98%
7	172.50	450	238	1.03	218.36	2.18	21.84	194.34	98%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	216	0.96	213.12	2.13	21.31	204.31	103%
10	183.00	439	300	1.11	154.29	1.54	15.43	198.43	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	313	1.10	137.50	1.38	13.75	196.75	99%
13	183.00	438	377	0.99	60.39	0.60	6.04	189.04	95%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	287	0.99	155.43	1.55	15.54	203.54	103%
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	99%
17	198.00	447	434	1.11	14.43	0.14	1.44	199.44	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	423	1.06	15.90	0.16	1.59	204.59	103%

**1+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474		2.08					
2	161.50	465		1.92					
3	161.50	485		2.11					
4	166.50	475		2.16					
5	166.50	480		2.21					
6	166.50	470		2.24					
7	169.00	442		1.12					
8	173.50	463		1.09					
9	178.00	445		1.10					
10	178.00	440		1.00					
11	178.00	442		1.01					
12	178.00	446		1.10					
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452		1.06					
15	188.00	442		1.10					
16	188.00	421		1.08					
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **12-Ene-87**

Cota de emb: 199.62 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	231	1.31	250.21	2.50	25.02	194.52	97%
2	169.50	416	174	1.20	290.40	2.90	29.04	198.54	99%
3	169.50	438	216	1.17	259.74	2.60	25.97	195.47	98%
4	174.50	415	224	1.23	234.93	2.35	23.49	197.99	99%
5	174.50	427	233	1.22	236.68	2.37	23.67	198.17	99%
6	174.50	466	329	1.17	160.29	1.60	16.03	190.53	95%
7	175.50	441	333	1.10	118.80	1.19	11.88	187.38	94%
8	179.50	445	281	1.22	200.08	2.00	20.01	199.51	100%
9	186.00	450	317	1.11	147.63	1.48	14.76	200.76	101%
10	186.00	432	296	1.21	164.56	1.65	16.46	202.46	101%
11	186.00	468	359	1.22	132.98	1.33	13.30	199.30	100%
12	186.00	450	345	1.15	120.75	1.21	12.08	198.08	99%
13	186.00	430	363	1.01	67.67	0.68	6.77	192.77	97%
14	191.00	449	340	0.95	103.55	1.04	10.36	201.36	101%
15	191.00	441	323	0.99	116.82	1.17	11.68	202.68	102%
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	101%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	423	1.13	25.99	0.26	2.60	203.60	102%
19	201.00	420	405	1.00	15.00	0.15	1.50	202.50	101%
20	206.00	437	420	1.13	19.21	0.19	1.92	207.92	104%

**0+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449		1.07					
2	166.50	466		0.93					
3	166.50	448		0.91					
4	171.00	460		1.09					
5	171.00	458		1.03					
6	171.00	431		1.13					
7	172.50	450		1.03					
8	177.00	445		1.15					
9	183.00	438		0.96					
10	183.00	439		1.11					
11	183.00	449		1.11					
12	183.00	438		1.10					
13	183.00	438		0.99					
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444		0.99					
16	188.00	442		1.09					
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439		1.10					
20	203.00	438		1.06					

**1+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474		2.08					
2	161.50	465		1.92					
3	161.50	485		2.11					
4	166.50	475		2.16					
5	166.50	480		2.21					
6	166.50	470		2.24					
7	169.00	442		1.12					
8	173.50	463		1.09					
9	178.00	445		1.10					
10	178.00	440		1.00					
11	178.00	442		1.01					
12	178.00	446		1.10					
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452		1.06					
15	188.00	442		1.10					
16	188.00	421		1.08					
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **03-Feb-87**

Cota de embalse 201.49 ms.n.m

Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

**0+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	217	1.07	248.24	2.48	24.82	191.32	95%
2	166.50	466	134	0.93	308.76	3.09	30.88	197.38	98%
3	166.50	448	126	0.91	293.02	2.93	29.30	195.80	97%
4	171.00	460	232	1.09	248.52	2.49	24.85	195.85	97%
5	171.00	458	194	1.03	271.92	2.72	27.19	198.19	98%
6	171.00	431	194	1.13	267.81	2.68	26.78	197.78	98%
7	172.50	450	225	1.03	231.75	2.32	23.18	195.68	97%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	251	0.96	179.52	1.80	17.95	200.95	100%
10	183.00	439	278	1.11	178.71	1.79	17.87	200.87	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	312	1.10	138.60	1.39	13.86	196.86	98%
13	183.00	438	377	0.99	60.39	0.60	6.04	189.04	94%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	287	0.99	155.43	1.55	15.54	203.54	101%
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	97%
17	198.00	447	413	1.11	37.74	0.38	3.77	201.77	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	423	1.06	15.90	0.16	1.59	204.59	102%

**1+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	296	2.08	370.24	3.70	37.02	198.52	99%
2	161.50	465	-	1.92					
3	161.50	485	346	2.11	293.29	2.93	29.33	190.83	95%
4	166.50	475	323	2.16	328.32	3.28	32.83	199.33	99%
5	166.50	480	333	2.21	324.87	3.25	32.49	198.99	99%
6	166.50	470	425	2.24	100.80	1.01	10.08	176.58	88%
7	169.00	442	281	1.12	180.32	1.80	18.03	187.03	93%
8	173.50	463	218	1.09	267.05	2.67	26.71	200.21	99%
9	178.00	445	259	1.10	204.60	2.05	20.46	198.46	98%
10	178.00	440	238	1.00	202.00	2.02	20.20	198.20	98%
11	178.00	442	247	1.01	196.95	1.97	19.70	197.70	98%
12	178.00	446	338	1.10	118.80	1.19	11.88	189.88	94%
13	178.00	432	401	1.08	33.48	0.33	3.35	181.35	90%
14	188.00	452	343	1.06	115.54	1.16	11.55	199.55	99%
15	188.00	442	354	1.10	96.80	0.97	9.68	197.68	98%
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	94%
17	198.00	453	431	1.00	22.00	0.22	2.20	200.20	99%
18	198.00	441	412	1.14	33.06	0.33	3.31	201.31	100%
19	198.00	404	375	1.11	32.19	0.32	3.22	201.22	100%
20	203.00	446	435	1.01	11.11	0.11	1.11	204.11	101%



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **05-Mar-87**

Cota de emb: 198.72 ms.n.m

Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	244	1.31	233.18	2.33	23.32	192.82	97%	
2	169.50	416	187	1.20	274.80	2.75	27.48	196.98	99%	
3	169.50	438	224	1.17	250.38	2.50	25.04	194.54	98%	
4	174.50	415	237	1.23	218.94	2.19	21.89	196.39	99%	
5	174.50	427	246	1.22	220.82	2.21	22.08	196.58	99%	
6	174.50	466	346	1.17	140.40	1.40	14.04	188.54	95%	
7	175.50	441	326	1.10	126.50	1.27	12.65	188.15	95%	
8	179.50	445	292	1.22	186.66	1.87	18.67	198.17	100%	
9	186.00	450	332	1.11	130.98	1.31	13.10	199.10	100%	
10	186.00	432	298	1.21	162.14	1.62	16.21	202.21	102%	
11	186.00	468	372	1.22	117.12	1.17	11.71	197.71	99%	
12	186.00	450	344	1.15	121.90	1.22	12.19	198.19	100%	
13	186.00	430	364	1.01	66.66	0.67	6.67	192.67	97%	
14	191.00	449	358	0.95	86.45	0.86	8.65	199.65	100%	
15	191.00	441	323	0.99	116.82	1.17	11.68	202.68	102%	
16	191.00	470	371	1.09	107.91	1.08	10.79	201.79	102%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	423	1.13	25.99	0.26	2.60	203.60	102%	
19	201.00	420	406	1.00	14.00	0.14	1.40	202.40	102%	
20	206.00	437	421	1.13	18.08	0.18	1.81	207.81	105%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+850</b>										
1	166.50	449	240	1.07	223.63	2.24	22.36	188.86	95%	
2	166.50	466	158	0.93	286.44	2.86	28.64	195.14	98%	
3	166.50	448	146	0.91	274.82	2.75	27.48	193.98	98%	
4	171.00	460	252	1.09	226.72	2.27	22.67	193.67	97%	
5	171.00	458	215	1.03	250.29	2.50	25.03	196.03	99%	
6	171.00	431	213	1.13	246.34	2.46	24.63	195.63	98%	
7	172.50	450	228	1.03	228.66	2.29	22.87	195.37	98%	
8	177.00	445	-	1.15						
9	183.00	438	274	0.96	157.44	1.57	15.74	198.74	100%	
10	183.00	439	298	1.11	156.51	1.57	15.65	198.65	100%	
11	183.00	449	-	1.11						
12	183.00	438	311	1.10	139.70	1.40	13.97	196.97	99%	
13	183.00	438	377	0.99	60.39	0.60	6.04	189.04	95%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	298	0.99	144.54	1.45	14.45	202.45	102%	
16	188.00	442	366	1.09	82.84	0.83	8.28	196.28	99%	
17	198.00	447	430	1.11	18.87	0.19	1.89	199.89	101%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	424	1.06	14.84	0.15	1.48	204.48	103%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>1+850</b>										
1	161.50	474	306	2.08	349.44	3.49	34.94	196.44	99%	
2	161.50	465	-	1.92						
3	161.50	485	350	2.11	284.85	2.85	28.49	189.99	96%	
4	166.50	475	333	2.16	306.72	3.07	30.67	197.17	99%	
5	166.50	480	343	2.21	302.77	3.03	30.28	196.78	99%	
6	166.50	470	438	2.24	71.68	0.72	7.17	173.67	87%	
7	169.00	442	283	1.12	178.08	1.78	17.81	186.81	94%	
8	173.50	463	238	1.09	245.25	2.45	24.53	198.03	100%	
9	178.00	445	263	1.10	200.20	2.00	20.02	198.02	100%	
10	178.00	440	241	1.00	199.00	1.99	19.90	197.90	100%	
11	178.00	442	246	1.01	197.96	1.98	19.80	197.80	100%	
12	178.00	446	337	1.10	119.90	1.20	11.99	189.99	96%	
13	178.00	432	402	1.08	32.40	0.32	3.24	181.24	91%	
14	188.00	452	364	1.06	93.28	0.93	9.33	197.33	99%	
15	188.00	442	352	1.10	99.00	0.99	9.90	197.90	100%	
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	96%	
17	198.00	453	443	1.00	10.00	0.10	1.00	199.00	100%	
18	198.00	441	412	1.14	33.06	0.33	3.31	201.31	101%	
19	198.00	404	475	1.11	-78.81	-0.79	-7.88	190.12	96%	
20	203.00	446	436	1.01	10.10	0.10	1.01	204.01	103%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **15-Mar-87**

Cota de embe 197.23 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

**0+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	252	1.07	210.79	2.11	21.08	187.58	95%
2	166.50	466	170	0.93	275.28	2.75	27.53	194.03	98%
3	166.50	448	157	0.91	264.81	2.65	26.48	192.98	98%
4	171.00	460	263	1.09	214.73	2.15	21.47	192.47	98%
5	171.00	458	226	1.03	238.96	2.39	23.90	194.90	99%
6	171.00	431	223	1.13	235.04	2.35	23.50	194.50	99%
7	172.50	450	232	1.03	224.54	2.25	22.45	194.95	99%
8	177.00	445	-	1.15					
9	183.00	438	286	0.96	145.92	1.46	14.59	197.59	100%
10	183.00	439	308	1.11	145.41	1.45	14.54	197.54	100%
11	183.00	449	-	1.11					
12	183.00	438	309	1.10	141.90	1.42	14.19	197.19	100%
13	183.00	438	376	0.99	61.38	0.61	6.14	189.14	96%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	287	0.99	155.43	1.55	15.54	203.54	103%
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	100%
17	198.00	447	437	1.11	11.10	0.11	1.11	199.11	101%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	422	1.06	16.96	0.17	1.70	204.70	104%

**1+850**

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474		2.08					
2	161.50	465		1.92					
3	161.50	485		2.11					
4	166.50	475		2.16					
5	166.50	480		2.21					
6	166.50	470		2.24					
7	169.00	442		1.12					
8	173.50	463		1.09					
9	178.00	445		1.10					
10	178.00	440		1.00					
11	178.00	442		1.01					
12	178.00	446		1.10					
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452		1.06					
15	188.00	442		1.10					
16	188.00	421		1.08					
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 24-Abr-87

Cota de embe 191.22 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+850</b>										
1	166.50	449	307	1.07	151.94	1.52	15.19	181.69	95%	
2	166.50	466	244	0.93	206.46	2.06	20.65	187.15	98%	
3	166.50	448	222	0.91	205.66	2.06	20.57	187.07	98%	
4	171.00	460	328	1.09	143.88	1.44	14.39	185.39	97%	
5	171.00	458	294	1.03	168.92	1.69	16.89	187.89	98%	
6	171.00	431	282	1.13	168.37	1.68	16.84	187.84	98%	
7	172.50	450	263	1.03	192.61	1.93	19.26	191.76	100%	
8	177.00	445	-	1.15						
9	183.00	438	359	0.96	75.84	0.76	7.58	190.58	100%	
10	183.00	439	371	1.11	75.48	0.75	7.55	190.55	100%	
11	183.00	449	380	1.11	76.59	0.77	7.66	190.66	100%	
12	183.00	438	310	1.10	140.80	1.41	14.08	197.08	103%	
13	183.00	438	377	0.99	60.39	0.60	6.04	189.04	99%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	288	0.99	154.44	1.54	15.44	203.44	106%	
16	188.00	442	366	1.09	82.84	0.83	8.28	196.28	103%	
17	198.00	447	440	1.11	7.77	0.08	0.78	198.78	104%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	424	1.06	14.84	0.15	1.48	204.48	107%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>1+850</b>										
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 25-May-87

Cota de emb: 193.78 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	333	1.31	116.59	1.17	11.66	181.16	93%	
2	169.50	416	281	1.20	162.00	1.62	16.20	185.70	96%	
3	169.50	438	-	1.17						
4	174.50	415	332	1.23	102.09	1.02	10.21	184.71	95%	
5	174.50	427	341	1.22	104.92	1.05	10.49	184.99	95%	
6	174.50	466	418	1.17	56.16	0.56	5.62	180.12	93%	
7	175.50	441	363	1.10	85.80	0.86	8.58	184.08	95%	
8	179.50	445	352	1.22	113.46	1.13	11.35	190.85	98%	
9	186.00	450	426	1.11	26.64	0.27	2.66	188.66	97%	
10	186.00	432	341	1.21	110.11	1.10	11.01	197.01	102%	
11	186.00	468	463	1.22	6.10	0.06	0.61	186.61	96%	
12	186.00	450	361	1.15	102.35	1.02	10.24	196.24	101%	
13	186.00	430	377	1.01	53.53	0.54	5.35	191.35	99%	
14	191.00	449	443	0.95	5.70	0.06	0.57	191.57	99%	
15	191.00	441	364	0.99	76.23	0.76	7.62	198.62	102%	
16	191.00	470	378	1.09	100.28	1.00	10.03	201.03	104%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	436	1.13	11.30	0.11	1.13	202.13	104%	
19	201.00	420	414	1.00	6.00	0.06	0.60	201.60	104%	
20	206.00	437	430	1.13	7.91	0.08	0.79	206.79	107%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	332	1.07	125.19	1.25	12.52	179.02	92%	
2	166.50	466	289	0.93	164.61	1.65	16.46	182.96	94%	
3	166.50	448	262	0.91	169.26	1.69	16.93	183.43	95%	
4	171.00	460	369	1.09	99.19	0.99	9.92	180.92	93%	
5	171.00	458	336	1.03	125.66	1.26	12.57	183.57	95%	
6	171.00	431	320	1.13	125.43	1.25	12.54	183.54	95%	
7	172.50	450	309	1.03	145.23	1.45	14.52	187.02	97%	
8	177.00	445	405	1.15	46.00	0.46	4.60	181.60	94%	
9	183.00	438	405	0.96	31.68	0.32	3.17	186.17	96%	
10	183.00	439	403	1.11	39.96	0.40	4.00	187.00	96%	
11	183.00	449	402	1.11	52.17	0.52	5.22	188.22	97%	
12	183.00	438	338	1.10	110.00	1.10	11.00	194.00	100%	
13	183.00	438	388	0.99	49.50	0.50	4.95	187.95	97%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	307	0.99	135.63	1.36	13.56	201.56	104%	
16	188.00	442	375	1.09	73.03	0.73	7.30	195.30	101%	
17	198.00	447	447	1.11	0.00	0.00	0.00	198.00	102%	
18	198.00	468	-	1.11	#¡VALOR!	#¡VALOR!	#¡VALOR!	#¡VALOR!	#¡VALOR!	
19	198.00	439	430	1.10	9.90	0.10	0.99	198.99	103%	
20	203.00	438	432	1.06	6.36	0.06	0.64	203.64	105%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 03-Nov-87

Cota de emb: 190 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	296	1.07	163.71	1.64	16.37	182.87	96%	
2	166.50	466	253	0.93	198.09	1.98	19.81	186.31	98%	
3	166.50	448	228	0.91	200.20	2.00	20.02	186.52	98%	
4	171.00	460	336	1.09	135.16	1.35	13.52	184.52	97%	
5	171.00	458	303	1.03	159.65	1.60	15.97	186.97	98%	
6	171.00	431	290	1.13	159.33	1.59	15.93	186.93	98%	
7	172.50	450	290	1.03	164.80	1.65	16.48	188.98	99%	
8	177.00	445	370	1.15	86.25	0.86	8.63	185.63	98%	
9	183.00	438	306	0.96	126.72	1.27	12.67	195.67	103%	
10	183.00	439	379	1.11	66.60	0.67	6.66	189.66	100%	
11	183.00	449	339	1.11	122.10	1.22	12.21	195.21	103%	
12	183.00	438	324	1.10	125.40	1.25	12.54	195.54	103%	
13	183.00	438	331	0.99	105.93	1.06	10.59	193.59	102%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	256	0.99	186.12	1.86	18.61	206.61	109%	
16	188.00	442	365	1.09	83.93	0.84	8.39	196.39	103%	
17	198.00	447	441	1.11	6.66	0.07	0.67	198.67	105%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	426	1.06	12.72	0.13	1.27	204.27	108%	

Piezómetro	Elevación Estlmada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474	350	2.08	257.92	2.58	25.79	187.29	99%	
2	161.50	465	336	1.92	247.68	2.48	24.77	186.27	98%	
3	161.50	485	394	2.11	192.01	1.92	19.20	180.70	95%	
4	166.50	475	376	2.16	213.84	2.14	21.38	187.88	99%	
5	166.50	480	335	2.21	320.45	3.20	32.05	198.55	104%	
6	166.50	470	434	2.24	80.64	0.81	8.06	174.56	92%	
7	169.00	442	315	1.12	142.24	1.42	14.22	183.22	96%	
8	173.50	463	321	1.09	154.78	1.55	15.48	188.98	99%	
9	178.00	445	370	1.10	82.50	0.83	8.25	186.25	98%	
10	178.00	440	357	1.00	83.00	0.83	8.30	186.30	98%	
11	178.00	442	358	1.01	84.84	0.85	8.48	186.48	98%	
12	178.00	446	363	1.10	91.30	0.91	9.13	187.13	98%	
13	178.00	432	412	1.08	21.60	0.22	2.16	180.16	95%	
14	188.00	452	447	1.06	5.30	0.05	0.53	188.53	99%	
15	188.00	442	407	1.10	38.50	0.39	3.85	191.85	101%	
16	188.00	421	402	1.08	20.52	0.21	2.05	190.05	100%	
17	198.00	453	447	1.00	6.00	0.06	0.60	198.60	105%	
18	198.00	441	415	1.14	29.64	0.30	2.96	200.96	106%	
19	198.00	404	477	1.11	-81.03	-0.81	-8.10	189.90	100%	
20	203.00	446	441	1.01	5.05	0.05	0.51	203.51	107%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **15-Ene-88**  
Cota de embals: 187.67 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	231	1.31	250.21	2.50	25.02	194.52	104%
2	169.50	416	279	1.20	164.40	1.64	16.44	185.94	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	230	1.23	227.55	2.28	22.76	197.26	105%
5	174.50	427	339	1.22	107.36	1.07	10.74	185.24	99%
6	174.50	466	416	1.17	58.50	0.59	5.85	180.35	98%
7	175.50	441	361	1.10	88.00	0.88	8.80	184.30	98%
8	179.50	445	350	1.22	115.90	1.16	11.59	191.09	102%
9	186.00	450	425	1.11	27.75	0.28	2.78	188.78	101%
10	186.00	432	339	1.21	112.53	1.13	11.25	197.25	105%
11	186.00	468	461	1.22	8.54	0.09	0.85	186.85	100%
12	186.00	450	356	1.15	108.10	1.08	10.81	196.81	105%
13	186.00	430	373	1.01	57.57	0.58	5.76	191.76	102%
14	191.00	449	440	0.95	8.55	0.09	0.86	191.86	102%
15	191.00	441	350	0.99	90.09	0.90	9.01	200.01	107%
16	191.00	470	375	1.09	103.55	1.04	10.36	201.36	107%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	434	1.13	13.56	0.14	1.36	202.36	108%
19	201.00	420	412	1.00	8.00	0.08	0.80	201.80	108%
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	110%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	330	1.07	127.33	1.27	12.73	179.23	96%
2	166.50	466	287	0.93	166.47	1.66	16.65	183.15	98%
3	166.50	448	280	0.91	171.08	1.71	17.11	183.61	98%
4	171.00	460	366	1.09	102.46	1.02	10.25	181.25	97%
5	171.00	458	334	1.03	127.72	1.28	12.77	183.77	98%
6	171.00	431	318	1.13	127.69	1.28	12.77	183.77	98%
7	172.50	450	305	1.03	149.35	1.49	14.94	187.44	100%
8	177.00	445	403	1.15	48.30	0.48	4.83	181.83	97%
9	183.00	438	403	0.96	33.60	0.34	3.36	186.36	99%
10	183.00	439	401	1.11	42.18	0.42	4.22	187.22	100%
11	183.00	449	410	1.11	43.29	0.43	4.33	187.33	100%
12	183.00	438	331	1.10	117.70	1.18	11.77	194.77	104%
13	183.00	438	335	0.99	101.97	1.02	10.20	193.20	103%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	301	0.99	141.57	1.42	14.16	202.16	108%
16	188.00	442	372	1.09	76.30	0.76	7.63	195.63	104%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	106%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	429	1.06	9.54	0.10	0.95	203.95	109%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	377	2.08	201.76	2.02	20.18	181.68	97%
2	161.50	465	364	1.92	193.92	1.94	19.39	180.89	96%
3	161.50	485	406	2.11	166.69	1.67	16.67	178.17	95%
4	166.50	475	401	2.16	159.84	1.60	15.98	182.48	97%
5	166.50	480	410	2.21	154.70	1.55	15.47	181.97	97%
6	166.50	470	463	2.24	15.68	0.16	1.57	168.07	90%
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	98%
8	173.50	463	369	1.09	102.46	1.02	10.25	183.75	98%
9	178.00	445	367	1.10	85.80	0.86	8.58	186.58	99%
10	178.00	440	347	1.00	93.00	0.93	9.30	187.30	100%
11	178.00	442	349	1.01	93.93	0.94	9.39	187.39	100%
12	178.00	446	369	1.10	84.70	0.85	8.47	186.47	99%
13	178.00	432	418	1.08	15.12	0.15	1.51	179.51	96%
14	188.00	452	450	1.06	2.12	0.02	0.21	188.21	100%
15	188.00	442	412	1.10	33.00	0.33	3.30	191.30	102%
16	188.00	421	405	1.08	17.28	0.17	1.73	189.73	101%
17	198.00	453	449	1.00	4.00	0.04	0.40	198.40	106%
18	198.00	441	421	1.14	22.80	0.23	2.28	200.28	107%
19	198.00	404	380	1.11	26.64	0.27	2.66	200.66	107%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	108%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **25-Ene-88**

Cota de embals 190 ms.n.m

Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	312	1.31	144.10	1.44	14.41	183.91	97%
2	169.50	416	264	1.20	182.40	1.82	18.24	187.74	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	313	1.23	125.46	1.25	12.55	187.05	98%
5	174.50	427	322	1.22	128.10	1.28	12.81	187.31	99%
6	174.50	466	396	1.17	81.90	0.82	8.19	182.69	96%
7	175.50	441	361	1.10	88.00	0.88	8.80	184.30	97%
8	179.50	445	347	1.22	119.56	1.20	11.96	191.46	101%
9	186.00	450	416	1.11	37.74	0.38	3.77	189.77	100%
10	186.00	432	336	1.21	116.16	1.16	11.62	197.62	104%
11	186.00	468	454	1.22	17.08	0.17	1.71	187.71	99%
12	186.00	450	357	1.15	106.95	1.07	10.70	196.70	104%
13	186.00	430	373	1.01	57.57	0.58	5.76	191.76	101%
14	191.00	449	441	0.95	7.60	0.08	0.76	191.76	101%
15	191.00	441	352	0.99	88.11	0.88	8.81	199.81	105%
16	191.00	470	376	1.09	102.46	1.02	10.25	201.25	106%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	434	1.13	13.56	0.14	1.36	202.36	107%
19	201.00	420	412	1.00	8.00	0.08	0.80	201.80	106%
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	109%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	296	1.07	163.71	1.64	16.37	182.87	96%
2	166.50	466	252	0.93	199.02	1.99	19.90	186.40	98%
3	166.50	448	227	0.91	201.11	2.01	20.11	186.61	98%
4	171.00	460	336	1.09	135.16	1.35	13.52	184.52	97%
5	171.00	458	302	1.03	160.68	1.61	16.07	187.07	98%
6	171.00	431	290	1.13	159.33	1.59	15.93	186.93	98%
7	172.50	450	297	1.03	157.59	1.58	15.76	188.26	99%
8	177.00	445	374	1.15	81.65	0.82	8.17	185.17	97%
9	183.00	438	368	0.96	67.20	0.67	6.72	189.72	100%
10	183.00	439	379	1.11	66.60	0.67	6.66	189.66	100%
11	183.00	449	390	1.11	65.49	0.65	6.55	189.55	100%
12	183.00	438	331	1.10	117.70	1.18	11.77	194.77	103%
13	183.00	438	385	0.99	52.47	0.52	5.25	188.25	99%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	302	0.99	140.58	1.41	14.06	202.06	106%
16	188.00	442	372	1.09	76.30	0.76	7.63	195.63	103%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	104%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	429	1.06	9.54	0.10	0.95	203.95	107%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	351	2.08	255.84	2.56	25.58	187.08	98%
2	161.50	465	338	1.92	243.84	2.44	24.38	185.88	98%
3	161.50	485	399	2.11	181.46	1.81	18.15	179.65	95%
4	166.50	475	377	2.16	211.68	2.12	21.17	187.67	99%
5	166.50	480	387	2.21	205.53	2.06	20.55	187.05	98%
6	166.50	470	433	2.24	82.88	0.83	8.29	174.79	92%
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	96%
8	173.50	463	322	1.09	153.69	1.54	15.37	188.87	99%
9	178.00	445	378	1.10	73.70	0.74	7.37	185.37	98%
10	178.00	440	359	1.00	81.00	0.81	8.10	186.10	98%
11	178.00	442	358	1.01	84.84	0.85	8.48	186.48	98%
12	178.00	446	370	1.10	83.60	0.84	8.36	186.36	98%
13	178.00	432	419	1.08	14.04	0.14	1.40	179.40	94%
14	188.00	452	450	1.06	2.12	0.02	0.21	188.21	99%
15	188.00	442	414	1.10	30.80	0.31	3.08	191.08	101%
16	188.00	421	406	1.08	16.20	0.16	1.62	189.62	100%
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	104%
18	198.00	441	421	1.14	22.80	0.23	2.28	200.28	105%
19	198.00	404	380	1.11	26.64	0.27	2.66	200.66	106%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	107%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **04-Feb-88**  
Cota de embals 192.09 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	281	1.07	179.76	1.80	17.98	184.48	96%
2	166.50	466	232	0.93	217.62	2.18	21.76	188.26	98%
3	166.50	448	219	0.91	208.39	2.08	20.84	187.34	98%
4	171.00	460	319	1.09	153.69	1.54	15.37	186.37	97%
5	171.00	458	284	1.03	179.22	1.79	17.92	188.92	98%
6	171.00	431	274	1.13	177.41	1.77	17.74	188.74	98%
7	172.50	450	289	1.03	165.83	1.66	16.58	189.08	98%
8	177.00	445	358	1.15	100.05	1.00	10.01	187.01	97%
9	183.00	438	349	0.96	85.44	0.85	8.54	191.54	100%
10	183.00	439	363	1.11	84.36	0.84	8.44	191.44	100%
11	183.00	449	372	1.11	85.47	0.85	8.55	191.55	100%
12	183.00	438	332	1.10	116.60	1.17	11.66	194.66	101%
13	183.00	438	385	0.99	52.47	0.52	5.25	188.25	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	302	0.99	140.58	1.41	14.06	202.06	105%
16	188.00	442	372	1.09	76.30	0.76	7.63	195.63	102%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	103%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	429	1.06	9.54	0.10	0.95	203.95	106%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	344	2.08	270.40	2.70	27.04	188.54	98%
2	161.50	465	327	1.92	264.96	2.65	26.50	188.00	98%
3	161.50	485	389	2.11	202.56	2.03	20.26	181.76	95%
4	166.50	475	369	2.16	228.96	2.29	22.90	189.40	99%
5	166.50	480	378	2.21	225.42	2.25	22.54	189.04	98%
6	166.50	470	427	2.24	96.32	0.96	9.63	176.13	92%
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	95%
8	173.50	463	304	1.09	173.31	1.73	17.33	190.83	99%
9	178.00	445	367	1.10	85.80	0.86	8.58	186.58	97%
10	178.00	440	354	1.00	86.00	0.86	8.60	186.60	97%
11	178.00	442	356	1.01	86.86	0.87	8.69	186.69	97%
12	178.00	446	371	1.10	82.50	0.83	8.25	186.25	97%
13	178.00	432	420	1.08	12.96	0.13	1.30	179.30	93%
14	188.00	452	431	1.06	22.26	0.22	2.23	190.23	99%
15	188.00	442	415	1.10	29.70	0.30	2.97	190.97	99%
16	188.00	421	406	1.08	16.20	0.16	1.62	189.62	99%
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	103%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	104%
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	104%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	106%



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **14-Feb-88**  
Cota de embalse 192.87 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	293	1.31	168.99	1.69	16.90	186.40	97%
2	169.50	416	240	1.20	211.20	2.11	21.12	190.62	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	289	1.23	154.98	1.55	15.50	190.00	99%
5	174.50	427	298	1.22	157.38	1.57	15.74	190.24	99%
6	174.50	466	376	1.17	105.30	1.05	10.53	185.03	96%
7	175.50	441	361	1.10	88.00	0.88	8.80	184.30	96%
8	179.50	445	339	1.22	129.32	1.29	12.93	192.43	100%
9	186.00	450	390	1.11	66.60	0.67	6.66	192.66	100%
10	186.00	432	328	1.21	125.84	1.26	12.58	198.58	103%
11	186.00	468	429	1.22	47.58	0.48	4.76	190.76	99%
12	186.00	450	358	1.15	105.80	1.06	10.58	196.58	102%
13	186.00	430	373	1.01	57.57	0.58	5.76	191.76	99%
14	191.00	449	424	0.95	23.75	0.24	2.38	193.38	100%
15	191.00	441	353	0.99	87.12	0.87	8.71	199.71	104%
16	191.00	470	376	1.09	102.46	1.02	10.25	201.25	104%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	434	1.13	13.56	0.14	1.36	202.36	105%
19	201.00	420	414	1.00	6.00	0.06	0.60	201.60	105%
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	107%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	278	1.07	182.97	1.83	18.30	184.80	96%
2	166.50	466	224	0.93	225.06	2.25	22.51	189.01	98%
3	166.50	448	202	0.91	223.86	2.24	22.39	188.89	98%
4	171.00	460	312	1.09	161.32	1.61	16.13	187.13	97%
5	171.00	458	277	1.03	186.43	1.86	18.64	189.64	98%
6	171.00	431	267	1.13	185.32	1.85	18.53	189.53	98%
7	172.50	450	286	1.03	168.92	1.69	16.89	189.39	98%
8	177.00	445	351	1.15	108.10	1.08	10.81	187.81	97%
9	183.00	438	340	0.96	94.08	0.94	9.41	192.41	100%
10	183.00	439	356	1.11	92.13	0.92	9.21	192.21	100%
11	183.00	449	365	1.11	93.24	0.93	9.32	192.32	100%
12	183.00	438	332	1.10	116.60	1.17	11.66	194.66	101%
13	183.00	438	385	0.99	52.47	0.52	5.25	188.25	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	302	0.99	140.58	1.41	14.06	202.06	105%
16	188.00	442	372	1.09	76.30	0.76	7.63	195.63	101%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	103%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	430	1.06	8.48	0.08	0.85	203.85	106%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	339	2.08	280.80	2.81	28.08	189.58	98%
2	161.50	465	324	1.92	270.72	2.71	27.07	188.57	98%
3	161.50	485	387	2.11	206.78	2.07	20.68	182.18	94%
4	166.50	475	366	2.16	235.44	2.35	23.54	190.04	99%
5	166.50	480	375	2.21	232.05	2.32	23.21	189.71	98%
6	166.50	470	427	2.24	96.32	0.96	9.63	176.13	91%
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	95%
8	173.50	463	297	1.09	180.94	1.81	18.09	191.59	99%
9	178.00	445	360	1.10	93.50	0.94	9.35	187.35	97%
10	178.00	440	348	1.00	92.00	0.92	9.20	187.20	97%
11	178.00	442	352	1.01	90.90	0.91	9.09	187.09	97%
12	178.00	446	372	1.10	81.40	0.81	8.14	186.14	97%
13	178.00	432	420	1.08	12.96	0.13	1.30	179.30	93%
14	188.00	452	424	1.06	29.68	0.30	2.97	190.97	99%
15	188.00	442	415	1.10	29.70	0.30	2.97	190.97	99%
16	188.00	421	406	1.08	16.20	0.16	1.62	189.62	98%
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	103%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	104%
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	104%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	105%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **24-Feb-88**  
Cota de embalse 193.04 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	295	1.31	166.37	1.66	16.64	186.14	96%
2	169.50	416	243	1.20	207.60	2.08	20.76	190.26	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	291	1.23	152.52	1.53	15.25	189.75	98%
5	174.50	427	300	1.22	154.94	1.55	15.49	189.99	98%
6	174.50	466	382	1.17	98.28	0.98	9.83	184.33	95%
7	175.50	441	362	1.10	86.90	0.87	8.69	184.19	95%
8	179.50	445	338	1.22	130.54	1.31	13.05	192.55	100%
9	186.00	450	392	1.11	64.38	0.64	6.44	192.44	100%
10	186.00	432	328	1.21	125.84	1.26	12.58	198.58	103%
11	186.00	468	432	1.22	43.92	0.44	4.39	190.39	99%
12	186.00	450	358	1.15	105.80	1.06	10.58	196.58	102%
13	186.00	430	374	1.01	56.56	0.57	5.66	191.66	99%
14	191.00	449	426	0.95	21.85	0.22	2.19	193.19	100%
15	191.00	441	354	0.99	86.13	0.86	8.61	199.61	103%
16	191.00	470	376	1.09	102.46	1.02	10.25	201.25	104%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	435	1.13	12.43	0.12	1.24	202.24	105%
19	201.00	420	414	1.00	6.00	0.06	0.60	201.60	104%
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	107%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	284	1.07	176.55	1.77	17.66	184.16	95%
2	166.50	466	227	0.93	222.27	2.22	22.23	188.73	98%
3	166.50	448	204	0.91	222.04	2.22	22.20	188.70	98%
4	171.00	460	314	1.09	159.14	1.59	15.91	186.91	97%
5	171.00	458	279	1.03	184.37	1.84	18.44	189.44	98%
6	171.00	431	270	1.13	181.93	1.82	18.19	189.19	98%
7	172.50	450	284	1.03	170.98	1.71	17.10	189.60	98%
8	177.00	445	354	1.15	104.65	1.05	10.47	187.47	97%
9	183.00	438	344	0.96	90.24	0.90	9.02	192.02	99%
10	183.00	439	358	1.11	89.91	0.90	8.99	191.99	99%
11	183.00	449	368	1.11	89.91	0.90	8.99	191.99	99%
12	183.00	438	333	1.10	115.50	1.16	11.55	194.55	101%
13	183.00	438	386	0.99	51.48	0.51	5.15	188.15	97%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	303	0.99	139.59	1.40	13.96	201.96	105%
16	188.00	442	373	1.09	75.21	0.75	7.52	195.52	101%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	103%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	429	1.06	9.54	0.10	0.95	203.95	106%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	341	2.08	276.64	2.77	27.66	189.16	98%
2	161.50	465	325	1.92	268.80	2.69	26.88	188.38	98%
3	161.50	485	386	2.11	208.89	2.09	20.89	182.39	94%
4	166.50	475	367	2.16	233.28	2.33	23.33	189.83	98%
5	166.50	480	376	2.21	229.84	2.30	22.98	189.48	98%
6	166.50	470	432	2.24	85.12	0.85	8.51	175.01	91%
7	169.00	442	316	1.12	141.12	1.41	14.11	183.11	95%
8	173.50	463	300	1.09	177.67	1.78	17.77	191.27	99%
9	178.00	445	350	1.10	104.50	1.05	10.45	188.45	98%
10	178.00	440	339	1.00	101.00	1.01	10.10	188.10	97%
11	178.00	442	345	1.01	97.97	0.98	9.80	187.80	97%
12	178.00	446	372	1.10	81.40	0.81	8.14	186.14	96%
13	178.00	432	420	1.08	12.96	0.13	1.30	179.30	93%
14	188.00	452	426	1.06	27.56	0.28	2.76	190.76	99%
15	188.00	442	415	1.10	29.70	0.30	2.97	190.97	99%
16	188.00	421	407	1.08	15.12	0.15	1.51	189.51	98%
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	103%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	104%
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	104%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	105%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **26-Mar-88**  
Cota de embalse 188.11 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	323	1.31	129.69	1.30	12.97	182.47	97%
2	169.50	416	272	1.20	172.80	1.73	17.28	186.78	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	321	1.23	115.62	1.16	11.56	186.06	99%
5	174.50	427	330	1.22	118.34	1.18	11.83	186.33	99%
6	174.50	466	412	1.17	63.18	0.63	6.32	180.82	96%
7	175.50	441	360	1.10	89.10	0.89	8.91	184.41	98%
8	179.50	445	347	1.22	119.56	1.20	11.96	191.46	102%
9	186.00	450	421	1.11	32.19	0.32	3.22	189.22	101%
10	186.00	432	337	1.21	114.95	1.15	11.50	197.50	105%
11	186.00	468	455	1.22	15.86	0.16	1.59	187.59	100%
12	186.00	450	358	1.15	105.80	1.06	10.58	196.58	105%
13	186.00	430	374	1.01	56.56	0.57	5.66	191.66	102%
14	191.00	449	438	0.95	10.45	0.10	1.05	192.05	102%
15	191.00	441	357	0.99	83.16	0.83	8.32	199.32	106%
16	191.00	470	375	1.09	103.55	1.04	10.36	201.36	107%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	434	1.13	13.56	0.14	1.36	202.36	108%
19	201.00	420	413	1.00	7.00	0.07	0.70	201.70	107%
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	110%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	327	1.07	130.54	1.31	13.05	179.55	95%
2	166.50	466	272	0.93	180.42	1.80	18.04	184.54	98%
3	166.50	448	246	0.91	183.82	1.84	18.38	184.88	98%
4	171.00	460	354	1.09	115.54	1.16	11.55	182.55	97%
5	171.00	458	321	1.03	141.11	1.41	14.11	185.11	98%
6	171.00	431	306	1.13	141.25	1.41	14.13	185.13	98%
7	172.50	450	297	1.03	157.59	1.58	15.76	188.26	100%
8	177.00	445	393	1.15	59.80	0.60	5.98	182.98	97%
9	183.00	438	388	0.96	48.00	0.48	4.80	187.80	100%
10	183.00	439	395	1.11	48.84	0.49	4.88	187.88	100%
11	183.00	449	402	1.11	52.17	0.52	5.22	188.22	100%
12	183.00	438	333	1.10	115.50	1.16	11.55	194.55	103%
13	183.00	438	385	0.99	52.47	0.52	5.25	188.25	100%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	304	0.99	138.60	1.39	13.86	201.86	107%
16	188.00	442	372	1.09	76.30	0.76	7.63	195.63	104%
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	105%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	429	1.06	9.54	0.10	0.95	203.95	108%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	362	2.08	232.96	2.33	23.30	184.80	98%
2	161.50	465	348	1.92	224.64	2.25	22.46	183.96	98%
3	161.50	485	397	2.11	185.68	1.86	18.57	180.07	96%
4	166.50	475	388	2.16	187.92	1.88	18.79	185.29	99%
5	166.50	480	397	2.21	183.43	1.83	18.34	184.84	98%
6	166.50	470	454	2.24	35.84	0.36	3.58	170.08	90%
7	169.00	442	316	1.12	141.12	1.41	14.11	183.11	97%
8	173.50	463	341	1.09	132.98	1.33	13.30	186.80	99%
9	178.00	445	355	1.10	99.00	0.99	9.90	187.90	100%
10	178.00	440	338	1.00	102.00	1.02	10.20	188.20	100%
11	178.00	442	340	1.01	103.02	1.03	10.30	188.30	100%
12	178.00	446	372	1.10	81.40	0.81	8.14	186.14	99%
13	178.00	432	421	1.08	11.88	0.12	1.19	179.19	95%
14	188.00	452	450	1.06	2.12	0.02	0.21	188.21	100%
15	188.00	442	415	1.10	29.70	0.30	2.97	190.97	102%
16	188.00	421	407	1.08	15.12	0.15	1.51	189.51	101%
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	105%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	106%
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	107%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	108%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 15-Abr-88

Cota de embals 191.27 ms.n.m

Cota de Referencia 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
0+350									
1	169.50	422	302	1.31	157.20	1.57	15.72	185.22	97%
2	169.50	416	250	1.20	199.20	1.99	19.92	189.42	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	300	1.23	141.45	1.41	14.15	188.65	99%
5	174.50	427	308	1.22	145.18	1.45	14.52	189.02	99%
6	174.50	466	384	1.17	95.94	0.96	9.59	184.09	96%
7	175.50	441	361	1.10	88.00	0.88	8.80	184.30	96%
8	179.50	445	343	1.22	124.44	1.24	12.44	191.94	100%
9	186.00	450	400	1.11	55.50	0.56	5.55	191.55	100%
10	186.00	432	333	1.21	119.79	1.20	11.98	197.98	104%
11	186.00	468	439	1.22	35.38	0.35	3.54	189.54	99%
12	186.00	450	360	1.15	103.50	1.04	10.35	196.35	103%
13	186.00	430	376	1.01	54.54	0.55	5.45	191.45	100%
14	191.00	449	437	0.95	11.40	0.11	1.14	192.14	100%
15	191.00	441	360	0.99	80.19	0.80	8.02	199.02	104%
16	191.00	470	377	1.09	101.37	1.01	10.14	201.14	105%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	436	1.13	11.30	0.11	1.13	202.13	106%
19	201.00	420	415	1.00	5.00	0.05	0.50	201.50	105%
20	206.00	437	429	1.13	9.04	0.09	0.90	206.90	108%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	289	1.07	171.20	1.71	17.12	183.62	96%
2	166.50	466	236	0.93	213.90	2.14	21.39	187.89	98%
3	166.50	448	214	0.91	212.94	2.13	21.29	187.79	98%
4	171.00	460	323	1.09	149.33	1.49	14.93	185.93	97%
5	171.00	458	288	1.03	175.10	1.75	17.51	188.51	99%
6	171.00	431	278	1.13	172.89	1.73	17.29	188.29	98%
7	172.50	450	292	1.03	162.74	1.63	16.27	188.77	99%
8	177.00	445	365	1.15	92.00	0.92	9.20	186.20	97%
9	183.00	438	353	0.96	81.60	0.82	8.16	191.16	100%
10	183.00	439	367	1.11	79.92	0.80	7.99	190.99	100%
11	183.00	449	376	1.11	81.03	0.81	8.10	191.10	100%
12	183.00	438	335	1.10	113.30	1.13	11.33	194.33	102%
13	183.00	438	386	0.99	51.48	0.51	5.15	188.15	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	305	0.99	137.61	1.38	13.76	201.76	105%
16	188.00	442	374	1.09	74.12	0.74	7.41	195.41	102%
17	198.00	447	446	1.11	1.11	0.01	0.11	198.11	104%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	-	1.10					
20	203.00	438	430	1.06	8.48	0.08	0.85	203.85	107%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	345	2.08	268.32	2.68	26.83	188.33	98%
2	161.50	465	331	1.92	257.28	2.57	25.73	187.23	98%
3	161.50	485	371	2.11	240.54	2.41	24.05	185.55	97%
4	166.50	475	372	2.16	222.48	2.22	22.25	188.75	99%
5	166.50	480	381	2.21	218.79	2.19	21.88	188.38	98%
6	166.50	470	434	2.24	80.64	0.81	8.06	174.56	91%
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	96%
8	173.50	463	309	1.09	167.86	1.68	16.79	190.29	99%
9	178.00	445	364	1.10	89.10	0.89	8.91	186.91	98%
10	178.00	440	346	1.00	94.00	0.94	9.40	187.40	98%
11	178.00	442	348	1.01	94.94	0.95	9.49	187.49	98%
12	178.00	446	374	1.10	79.20	0.79	7.92	185.92	97%
13	178.00	432	423	1.08	9.72	0.10	0.97	178.97	94%
14	188.00	452	436	1.06	16.96	0.17	1.70	189.70	99%
15	188.00	442	417	1.10	27.50	0.28	2.75	190.75	100%
16	188.00	421	408	1.08	14.04	0.14	1.40	189.40	99%
17	198.00	453	451	1.00	2.00	0.02	0.20	198.20	104%
18	198.00	441	423	1.14	20.52	0.21	2.05	200.05	105%
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	105%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	106%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **25-Abr-88**  
Cota de embalse 189.47 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	313	1.31	142.79	1.43	14.28	183.78	97%	
2	169.50	416	267	1.20	178.80	1.79	17.88	187.38	99%	
3	169.50	438	-	1.17						
4	174.50	415	316	1.23	121.77	1.22	12.18	186.68	99%	
5	174.50	427	325	1.22	124.44	1.24	12.44	186.94	99%	
6	174.50	466	404	1.17	72.54	0.73	7.25	181.75	96%	
7	175.50	441	360	1.10	89.10	0.89	8.91	184.41	97%	
8	179.50	445	346	1.22	120.78	1.21	12.08	191.58	101%	
9	186.00	450	418	1.11	35.52	0.36	3.55	189.55	100%	
10	186.00	432	335	1.21	117.37	1.17	11.74	197.74	104%	
11	186.00	468	454	1.22	17.08	0.17	1.71	187.71	99%	
12	186.00	450	359	1.15	104.65	1.05	10.47	196.47	104%	
13	186.00	430	375	1.01	55.55	0.56	5.56	191.56	101%	
14	191.00	449	439	0.95	9.50	0.10	0.95	191.95	101%	
15	191.00	441	359	0.99	81.18	0.81	8.12	199.12	105%	
16	191.00	470	376	1.09	102.46	1.02	10.25	201.25	106%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	434	1.13	13.56	0.14	1.36	202.36	107%	
19	201.00	420	413	1.00	7.00	0.07	0.70	201.70	106%	
20	206.00	437	428	1.13	10.17	0.10	1.02	207.02	109%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	314	1.07	144.45	1.44	14.45	180.95	96%	
2	166.50	466	263	0.93	188.79	1.89	18.88	185.38	98%	
3	166.50	448	237	0.91	192.01	1.92	19.20	185.70	98%	
4	171.00	460	346	1.09	124.26	1.24	12.43	183.43	97%	
5	171.00	458	312	1.03	150.38	1.50	15.04	186.04	98%	
6	171.00	431	299	1.13	149.16	1.49	14.92	185.92	98%	
7	172.50	450	296	1.03	158.62	1.59	15.86	188.36	99%	
8	177.00	445	370	1.15	86.25	0.86	8.63	185.63	98%	
9	183.00	438	379	0.96	56.64	0.57	5.66	188.66	100%	
10	183.00	439	388	1.11	56.61	0.57	5.66	188.66	100%	
11	183.00	449	397	1.11	57.72	0.58	5.77	188.77	100%	
12	183.00	438	335	1.10	113.30	1.13	11.33	194.33	103%	
13	183.00	438	381	0.99	56.43	0.56	5.64	188.64	100%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	304	0.99	138.60	1.39	13.86	201.86	107%	
16	188.00	442	373	1.09	75.21	0.75	7.52	195.52	103%	
17	198.00	447	445	1.11	2.22	0.02	0.22	198.22	105%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	-	1.10						
20	203.00	438	430	1.06	8.48	0.08	0.85	203.85	108%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474	357	2.08	243.36	2.43	24.34	185.84	98%	
2	161.50	465	342	1.92	236.16	2.36	23.62	185.12	98%	
3	161.50	485	394	2.11	192.01	1.92	19.20	180.70	95%	
4	166.50	475	383	2.16	198.72	1.99	19.87	186.37	98%	
5	166.50	480	392	2.21	194.48	1.94	19.45	185.95	98%	
6	166.50	470	446	2.24	53.76	0.54	5.38	171.88	91%	
7	169.00	442	317	1.12	140.00	1.40	14.00	183.00	97%	
8	173.50	463	331	1.09	143.88	1.44	14.39	187.89	99%	
9	178.00	445	359	1.10	94.60	0.95	9.46	187.46	99%	
10	178.00	440	343	1.00	97.00	0.97	9.70	187.70	99%	
11	178.00	442	346	1.01	96.96	0.97	9.70	187.70	99%	
12	178.00	446	374	1.10	79.20	0.79	7.92	185.92	98%	
13	178.00	432	423	1.08	9.72	0.10	0.97	178.97	94%	
14	188.00	452	450	1.06	2.12	0.02	0.21	188.21	99%	
15	188.00	442	417	1.10	27.50	0.28	2.75	190.75	101%	
16	188.00	421	408	1.08	14.04	0.14	1.40	189.40	100%	
17	198.00	453	450	1.00	3.00	0.03	0.30	198.30	105%	
18	198.00	441	423	1.14	20.52	0.21	2.05	200.05	106%	
19	198.00	404	381	1.11	25.53	0.26	2.55	200.55	106%	
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	107%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **05-Dic-88**  
Cota de embals: 191.14 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	307	1.31	150.65	1.51	15.07	184.57	97%
2	169.50	416	255	1.20	193.20	1.93	19.32	188.82	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	304	1.23	136.53	1.37	13.65	188.15	98%
5	174.50	427	313	1.22	139.08	1.39	13.91	188.41	99%
6	174.50	466	387	1.17	92.43	0.92	9.24	183.74	96%
7	175.50	441	376	1.10	71.50	0.72	7.15	182.65	96%
8	179.50	445	350	1.22	115.90	1.16	11.59	191.09	100%
9	186.00	450	406	1.11	48.84	0.49	4.88	190.88	100%
10	186.00	432	337	1.21	114.95	1.15	11.50	197.50	103%
11	186.00	468	444	1.22	29.28	0.29	2.93	188.93	99%
12	186.00	450	371	1.15	90.85	0.91	9.09	195.09	102%
13	186.00	430	383	1.01	47.47	0.47	4.75	190.75	100%
14	191.00	449	440	0.95	8.55	0.09	0.86	191.86	100%
15	191.00	441	376	0.99	64.35	0.64	6.44	197.44	103%
16	191.00	470	380	1.09	98.10	0.98	9.81	200.81	105%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	440	1.13	6.78	0.07	0.68	201.68	106%
19	201.00	420	413	1.00	7.00	0.07	0.70	201.70	106%
20	206.00	437	433	1.13	4.52	0.05	0.45	206.45	108%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	293	1.07	166.92	1.67	16.69	183.19	96%
2	166.50	466	243	0.93	207.39	2.07	20.74	187.24	98%
3	166.50	448	220	0.91	207.48	2.07	20.75	187.25	98%
4	171.00	460	329	1.09	142.79	1.43	14.28	185.28	97%
5	171.00	458	295	1.03	167.89	1.68	16.79	187.79	98%
6	171.00	431	284	1.13	166.11	1.66	16.61	187.61	98%
7	172.50	450	304	1.03	150.38	1.50	15.04	187.54	98%
8	177.00	445	366	1.15	90.85	0.91	9.09	186.09	97%
9	183.00	438	360	0.96	74.88	0.75	7.49	190.49	100%
10	183.00	439	372	1.11	74.37	0.74	7.44	190.44	100%
11	183.00	449	381	1.11	75.48	0.75	7.55	190.55	100%
12	183.00	438	350	1.10	96.80	0.97	9.68	192.68	101%
13	183.00	438	391	0.99	46.53	0.47	4.65	187.65	98%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	316	0.99	126.72	1.27	12.67	200.67	105%
16	188.00	442	379	1.09	68.67	0.69	6.87	194.87	102%
17	198.00	447	446	1.11	1.11	0.01	0.11	198.11	104%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	435	1.10	4.40	0.04	0.44	198.44	104%
20	203.00	438	432	1.06	6.36	0.06	0.64	203.64	107%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	349	2.08	260.00	2.60	26.00	187.50	98%
2	161.50	465	334	1.92	251.52	2.52	25.15	186.65	98%
3	161.50	485	395	2.11	189.90	1.90	18.99	180.49	94%
4	166.50	475	375	2.16	216.00	2.16	21.60	188.10	98%
5	166.50	480	384	2.21	212.16	2.12	21.22	187.72	98%
6	166.50	470	427	2.24	96.32	0.96	9.63	176.13	92%
7	169.00	442	325	1.12	131.04	1.31	13.10	182.10	95%
8	173.50	463	314	1.09	162.41	1.62	16.24	189.74	99%
9	178.00	445	381	1.10	70.40	0.70	7.04	185.04	97%
10	178.00	440	375	1.00	65.00	0.65	6.50	184.50	97%
11	178.00	442	382	1.01	60.60	0.61	6.06	184.06	96%
12	178.00	446	386	1.10	66.00	0.66	6.60	184.60	97%
13	178.00	432	431	1.08	1.08	0.01	0.11	178.11	93%
14	188.00	452	439	1.06	13.78	0.14	1.38	189.38	99%
15	188.00	442	432	1.10	11.00	0.11	1.10	189.10	99%
16	188.00	421	412	1.08	9.72	0.10	0.97	188.97	99%
17	198.00	453	452	1.00	1.00	0.01	0.10	198.10	104%
18	198.00	441	427	1.14	15.96	0.16	1.60	199.60	104%
19	198.00	404	384	1.11	22.20	0.22	2.22	200.22	105%
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	106%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **15-Dic-88**  
 Cota de embalse 190.39 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	317	1.31	137.55	1.38	13.76	183.26	96%	
2	169.50	416	266	1.20	180.00	1.80	18.00	187.50	98%	
3	169.50	438	-	1.17						
4	174.50	415	316	1.23	121.77	1.22	12.18	186.68	98%	
5	174.50	427	324	1.22	125.66	1.26	12.57	187.07	98%	
6	174.50	466	401	1.17	76.05	0.76	7.61	182.11	96%	
7	175.50	441	377	1.10	70.40	0.70	7.04	182.54	96%	
8	179.50	445	354	1.22	111.02	1.11	11.10	190.60	100%	
9	186.00	450	418	1.11	35.52	0.36	3.55	189.55	100%	
10	186.00	432	340	1.21	111.32	1.11	11.13	197.13	104%	
11	186.00	468	450	1.22	21.96	0.22	2.20	188.20	99%	
12	186.00	450	372	1.15	89.70	0.90	8.97	194.97	102%	
13	186.00	430	382	1.01	48.48	0.48	4.85	190.85	100%	
14	191.00	449	447	0.95	1.90	0.02	0.19	191.19	100%	
15	191.00	441	378	0.99	62.37	0.62	6.24	197.24	104%	
16	191.00	470	380	1.09	98.10	0.98	9.81	200.81	105%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	441	1.13	5.65	0.06	0.57	201.57	106%	
19	201.00	420	418	1.00	2.00	0.02	0.20	201.20	106%	
20	206.00	437	433	1.13	4.52	0.05	0.45	206.45	108%	

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	312	1.07	146.59	1.47	14.66	181.16	95%	
2	166.50	466	259	0.93	192.51	1.93	19.25	185.75	98%	
3	166.50	448	234	0.91	194.74	1.95	19.47	185.97	98%	
4	171.00	460	342	1.09	128.62	1.29	12.86	183.86	97%	
5	171.00	458	308	1.03	154.50	1.55	15.45	186.45	98%	
6	171.00	431	296	1.13	152.55	1.53	15.26	186.26	98%	
7	172.50	450	307	1.03	147.29	1.47	14.73	187.23	98%	
8	177.00	445	383	1.15	71.30	0.71	7.13	184.13	97%	
9	183.00	438	374	0.96	61.44	0.61	6.14	189.14	99%	
10	183.00	439	385	1.11	59.94	0.60	5.99	188.99	99%	
11	183.00	449	396	1.11	58.83	0.59	5.88	188.88	99%	
12	183.00	438	351	1.10	95.70	0.96	9.57	192.57	101%	
13	183.00	438	392	0.99	45.54	0.46	4.55	187.55	99%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	317	0.99	125.73	1.26	12.57	200.57	105%	
16	188.00	442	379	1.09	68.67	0.69	6.87	194.87	102%	
17	198.00	447	446	1.11	1.11	0.01	0.11	198.11	104%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	104%	
20	203.00	438	433	1.06	5.30	0.05	0.53	203.53	107%	

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **25-Dic-88**  
Cota de embals: 189.42 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	322	1.31	131.00	1.31	13.10	182.60	96%
2	169.50	416	272	1.20	172.80	1.73	17.28	186.78	99%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	321	1.23	115.62	1.16	11.56	186.06	98%
5	174.50	427	330	1.22	118.34	1.18	11.83	186.33	98%
6	174.50	466	407	1.17	69.03	0.69	6.90	181.40	96%
7	175.50	441	377	1.10	70.40	0.70	7.04	182.54	96%
8	179.50	445	355	1.22	109.80	1.10	10.98	190.48	101%
9	186.00	450	424	1.11	28.86	0.29	2.89	188.89	100%
10	186.00	432	342	1.21	108.90	1.09	10.89	196.89	104%
11	186.00	468	462	1.22	7.32	0.07	0.73	186.73	99%
12	186.00	450	372	1.15	89.70	0.90	8.97	194.97	103%
13	186.00	430	384	1.01	46.46	0.46	4.65	190.65	101%
14	191.00	449	445	0.95	3.80	0.04	0.38	191.38	101%
15	191.00	441	378	0.99	62.37	0.62	6.24	197.24	104%
16	191.00	470	381	1.09	97.01	0.97	9.70	200.70	106%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	441	1.13	5.65	0.06	0.57	201.57	106%
19	201.00	420	418	1.00	2.00	0.02	0.20	201.20	106%
20	206.00	437	433	1.13	4.52	0.05	0.45	206.45	109%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
<b>0+850</b>									
1	166.50	449		1.07					
2	166.50	466		0.93					
3	166.50	448		0.91					
4	171.00	460		1.09					
5	171.00	458		1.03					
6	171.00	431		1.13					
7	172.50	450		1.03					
8	177.00	445		1.15					
9	183.00	438		0.96					
10	183.00	439		1.11					
11	183.00	449		1.11					
12	183.00	438		1.10					
13	183.00	438		0.99					
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444		0.99					
16	188.00	442		1.09					
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439		1.10					
20	203.00	438		1.06					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros				
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
<b>1+850</b>									
1	161.50	474		2.08					
2	161.50	465		1.92					
3	161.50	485		2.11					
4	166.50	475		2.16					
5	166.50	480		2.21					
6	166.50	470		2.24					
7	169.00	442		1.12					
8	173.50	463		1.09					
9	178.00	445		1.10					
10	178.00	440		1.00					
11	178.00	442		1.01					
12	178.00	446		1.10					
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452		1.06					
15	188.00	442		1.10					
16	188.00	421		1.08					
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **14-Ene-89**  
Cota de emb: 194.02 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	278	1.07	182.97	1.83	18.30	184.80	95%	
2	166.50	466	217	0.93	231.57	2.32	23.16	189.66	98%	
3	166.50	448	197	0.91	228.41	2.28	22.84	189.34	98%	
4	171.00	460	307	1.09	166.77	1.67	16.68	187.68	97%	
5	171.00	458	271	1.03	192.61	1.93	19.26	190.26	98%	
6	171.00	431	263	1.13	189.84	1.90	18.98	189.98	98%	
7	172.50	450	294	1.03	160.68	1.61	16.07	188.57	97%	
8	177.00	445	354	1.15	104.65	1.05	10.47	187.47	97%	
9	183.00	438	334	0.96	99.84	1.00	9.98	192.98	99%	
10	183.00	439	351	1.11	97.68	0.98	9.77	192.77	99%	
11	183.00	449	360	1.11	98.79	0.99	9.88	192.88	99%	
12	183.00	438	354	1.10	92.40	0.92	9.24	192.24	99%	
13	183.00	438	392	0.99	45.54	0.46	4.55	187.55	97%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	319	0.99	123.75	1.24	12.38	200.38	103%	
16	188.00	442	380	1.09	67.58	0.68	6.76	194.76	100%	
17	198.00	447	446	1.11	1.11	0.01	0.11	198.11	102%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	102%	
20	203.00	438	433	1.06	5.30	0.05	0.53	203.53	105%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474	338	2.08	282.88	2.83	28.29	189.79	98%	
2	161.50	465	322	1.92	274.56	2.75	27.46	188.96	97%	
3	161.50	485	388	2.11	204.67	2.05	20.47	181.97	94%	
4	166.50	475	364	2.16	239.76	2.40	23.98	190.48	98%	
5	166.50	480	374	2.21	234.26	2.34	23.43	189.93	98%	
6	166.50	470	426	2.24	98.56	0.99	9.86	176.36	91%	
7	169.00	442	324	1.12	132.16	1.32	13.22	182.22	94%	
8	173.50	463	292	1.09	186.39	1.86	18.64	192.14	99%	
9	178.00	445	362	1.10	91.30	0.91	9.13	187.13	96%	
10	178.00	440	354	1.00	86.00	0.86	8.60	186.60	96%	
11	178.00	442	360	1.01	82.82	0.83	8.28	186.28	96%	
12	178.00	446	386	1.10	66.00	0.66	6.60	184.60	95%	
13	178.00	432	431	1.08	1.08	0.01	0.11	178.11	92%	
14	188.00	452	418	1.06	36.04	0.36	3.60	191.60	99%	
15	188.00	442	432	1.10	11.00	0.11	1.10	189.10	97%	
16	188.00	421	413	1.08	8.64	0.09	0.86	188.86	97%	
17	198.00	453	452	1.00	1.00	0.01	0.10	198.10	102%	
18	198.00	441	427	1.14	15.96	0.16	1.60	199.60	103%	
19	198.00	404	384	1.11	22.20	0.22	2.22	200.22	103%	
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	105%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 04-Abr-89  
Cota de emb: 206.24 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	214	1.07	251.45	2.51	25.15	191.65	93%	
2	166.50	466	191	0.93	255.75	2.56	25.58	192.08	93%	
3	166.50	448	89	0.91	328.69	3.27	32.67	199.17	97%	
4	171.00	460	198	1.09	285.58	2.86	28.56	199.56	97%	
5	171.00	458	157	1.03	310.03	3.10	31.00	202.00	98%	
6	171.00	431	163	1.13	302.84	3.03	30.28	201.28	98%	
7	172.50	450	229	1.03	227.63	2.28	22.76	195.26	95%	
8	177.00	445	282	1.15	187.45	1.87	18.75	195.75	95%	
9	183.00	438	211	0.96	217.92	2.18	21.79	204.79	99%	
10	183.00	439	245	1.11	215.34	2.15	21.53	204.53	99%	
11	183.00	449	253	1.11	217.56	2.18	21.76	204.76	99%	
12	183.00	438	352	1.10	94.60	0.95	9.46	192.46	93%	
13	183.00	438	393	0.99	44.55	0.45	4.46	187.46	91%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	321	0.99	121.77	1.22	12.18	200.18	97%	
16	188.00	442	380	1.09	67.58	0.68	6.76	194.76	94%	
17	198.00	447	379	1.11	75.48	0.75	7.55	205.55	100%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	96%	
20	203.00	438	433	1.06	5.30	0.05	0.53	203.53	99%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **14-Abr-89**  
Cota de emb: 206.41 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	214	1.07	251.45	2.51	25.15	191.65	93%	
2	166.50	466	87	0.93	352.47	3.52	35.25	201.75	98%	
3	166.50	448	86	0.91	329.42	3.29	32.94	199.44	97%	
4	171.00	460	195	1.09	288.85	2.89	28.89	199.89	97%	
5	171.00	458	153	1.03	314.15	3.14	31.42	202.42	98%	
6	171.00	431	160	1.13	306.23	3.06	30.62	201.62	98%	
7	172.50	450	224	1.03	232.78	2.33	23.28	195.78	95%	
8	177.00	445	281	1.15	188.60	1.89	18.86	195.86	95%	
9	183.00	438	207	0.96	221.76	2.22	22.18	205.18	99%	
10	183.00	439	242	1.11	218.67	2.19	21.87	204.87	99%	
11	183.00	449	250	1.11	220.89	2.21	22.09	205.09	99%	
12	183.00	438	352	1.10	94.60	0.95	9.46	192.46	93%	
13	183.00	438	393	0.99	44.55	0.45	4.46	187.46	91%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	321	0.99	121.77	1.22	12.18	200.18	97%	
16	188.00	442	381	1.09	66.49	0.66	6.65	194.65	94%	
17	198.00	447	376	1.11	78.81	0.79	7.88	205.88	100%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	96%	
20	203.00	438	434	1.06	4.24	0.04	0.42	203.42	99%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **14-May-89**  
 Cota de emb: 207.04 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presión de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presión de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+850</b>										
1	166.50	449		1.07						
2	166.50	466		0.93						
3	166.50	448		0.91						
4	171.00	460		1.09						
5	171.00	458		1.03						
6	171.00	431		1.13						
7	172.50	450		1.03						
8	177.00	445		1.15						
9	183.00	438		0.96						
10	183.00	439		1.11						
11	183.00	449		1.11						
12	183.00	438		1.10						
13	183.00	438		0.99						
14	188.00	432		1.10						
15	188.00	444		0.99						
16	188.00	442		1.09						
17	198.00	447		1.11						
18	198.00	468		1.11						
19	198.00	439		1.10						
20	203.00	438		1.06						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Presión de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>1+850</b>										
1	161.50	474	276	2.08	411.84	4.12	41.18	202.68	98%	
2	161.50	465	255	1.92	403.20	4.03	40.32	201.82	97%	
3	161.50	485	348	2.11	289.07	2.89	28.91	190.41	92%	
4	166.50	475	304	2.16	369.36	3.69	36.94	203.44	98%	
5	166.50	480	316	2.21	362.44	3.62	36.24	202.74	98%	
6	166.50	470	415	2.24	123.20	1.23	12.32	178.82	86%	
7	169.00	442	280	1.12	181.44	1.81	18.14	187.14	90%	
8	173.50	463	173	1.09	316.10	3.16	31.61	205.11	99%	
9	178.00	445	214	1.10	254.10	2.54	25.41	203.41	98%	
10	178.00	440	184	1.00	256.00	2.56	25.60	203.60	98%	
11	178.00	442	192	1.01	252.50	2.53	25.25	203.25	98%	
12	178.00	446	365	1.10	89.10	0.89	8.91	186.91	90%	
13	178.00	432	430	1.08	2.16	0.02	0.22	178.22	86%	
14	188.00	452	297	1.06	164.30	1.64	16.43	204.43	99%	
15	188.00	442	313	1.10	141.90	1.42	14.19	202.19	98%	
16	188.00	421	413	1.08	8.64	0.09	0.86	188.86	91%	
17	198.00	453	383	1.00	70.00	0.70	7.00	205.00	99%	
18	198.00	441	400	1.14	46.74	0.47	4.67	202.67	98%	
19	198.00	404	384	1.11	22.20	0.22	2.22	200.22	97%	
20	203.00	446	445	1.01	1.01	0.01	0.10	203.10	98%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **05-Jun-89**  
Cota de emb: 205.64 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	239	1.07	224.70	2.25	22.47	188.97	92%	
2	166.50	466	97	0.93	343.17	3.43	34.32	200.82	98%	
3	166.50	448	96	0.91	320.32	3.20	32.03	198.53	97%	
4	171.00	460	204	1.09	279.04	2.79	27.90	198.90	97%	
5	171.00	458	162	1.03	304.88	3.05	30.49	201.49	98%	
6	171.00	431	167	1.13	298.32	2.98	29.83	200.83	98%	
7	172.50	450	213	1.03	244.11	2.44	24.41	196.91	96%	
8	177.00	445	297	1.15	170.20	1.70	17.02	194.02	94%	
9	183.00	438	216	0.96	213.12	2.13	21.31	204.31	99%	
10	183.00	439	249	1.11	210.90	2.11	21.09	204.09	99%	
11	183.00	449	258	1.11	212.01	2.12	21.20	204.20	99%	
12	183.00	438	342	1.10	105.60	1.06	10.56	193.56	94%	
13	183.00	438	393	0.99	44.55	0.45	4.46	187.46	91%	
14	188.00	432	-	1.10						
15	188.00	444	320	0.99	122.76	1.23	12.28	200.28	97%	
16	188.00	442	381	1.09	66.49	0.66	6.65	194.65	95%	
17	198.00	447	383	1.11	71.04	0.71	7.10	205.10	100%	
18	198.00	468	-	1.11						
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	96%	
20	203.00	438	434	1.06	4.24	0.04	0.42	203.42	99%	

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 05-Jun-89  
Cota de emba 205.64 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	239	1.07	224.70	2.25	22.47	188.97	92%
2	166.50	466	97	0.93	343.17	3.43	34.32	200.82	98%
3	166.50	448	96	0.91	320.32	3.20	32.03	198.53	97%
4	171.00	460	204	1.09	279.04	2.79	27.90	198.90	97%
5	171.00	458	162	1.03	304.88	3.05	30.49	201.49	98%
6	171.00	431	167	1.13	298.32	2.98	29.83	200.83	98%
7	172.50	450	213	1.03	244.11	2.44	24.41	196.91	96%
8	177.00	445	297	1.15	170.20	1.70	17.02	194.02	94%
9	183.00	438	216	0.96	213.12	2.13	21.31	204.31	99%
10	183.00	439	249	1.11	210.90	2.11	21.09	204.09	99%
11	183.00	449	258	1.11	212.01	2.12	21.20	204.20	99%
12	183.00	438	342	1.10	105.60	1.06	10.56	193.56	94%
13	183.00	438	393	0.99	44.55	0.45	4.46	187.46	91%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	320	0.99	122.76	1.23	12.28	200.28	97%
16	188.00	442	381	1.09	66.49	0.66	6.65	194.65	95%
17	198.00	447	383	1.11	71.04	0.71	7.10	205.10	100%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	436	1.10	3.30	0.03	0.33	198.33	96%
20	203.00	438	434	1.06	4.24	0.04	0.42	203.42	99%

Piezómetro	Elevación Estimada m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474		2.08					
2	161.50	465		1.92					
3	161.50	485		2.11					
4	166.50	475		2.16					
5	166.50	480		2.21					
6	166.50	470		2.24					
7	169.00	442		1.12					
8	173.50	463		1.09					
9	178.00	445		1.10					
10	178.00	440		1.00					
11	178.00	442		1.01					
12	178.00	446		1.10					
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452		1.06					
15	188.00	442		1.10					
16	188.00	421		1.08					
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **14-Mar-94**  
 Cota de embals 211.53 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	382	1.31	52.40	0.52	5.24	174.74	83%	
2	169.50	416	236	1.20	216.00	2.16	21.60	191.10	90%	
3	169.50	438	302	1.17	159.12	1.59	15.91	185.41	88%	
4	174.50	415	404	1.23	13.53	0.14	1.35	175.85	83%	
5	174.50	427	226	1.22	245.22	2.45	24.52	199.02	94%	
6	174.50	466	374	1.17	107.64	1.08	10.76	185.26	88%	
7	175.50	441	398	1.10	47.30	0.47	4.73	180.23	85%	
8	179.50	445	405	1.22	48.80	0.49	4.88	184.38	87%	
9	186.00	450	292	1.11	175.38	1.75	17.54	203.54	96%	
10	186.00	432	291	1.21	170.61	1.71	17.06	203.06	96%	
11	186.00	468	238	1.22	280.60	2.81	28.06	214.06	101%	
12	186.00	450	230	1.15	253.00	2.53	25.30	211.30	100%	
13	186.00	430	164	1.01	268.66	2.69	26.87	212.87	101%	
14	191.00	449	94	0.95	337.25	3.37	33.73	224.73	106%	
15	191.00	441	229	0.99	209.88	2.10	20.99	211.99	100%	
16	191.00	470	314	1.09	170.04	1.70	17.00	208.00	98%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	297	1.13	168.37	1.68	16.84	217.84	103%	
19	201.00	420	314	1.00	106.00	1.06	10.60	211.60	100%	
20	206.00	437	314	1.13	138.99	1.39	13.90	219.90	104%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	195	1.07	271.78	2.72	27.18	193.68	92%	
2	166.50	466	194	0.93	252.96	2.53	25.30	191.80	91%	
3	166.50	448	194	0.91	231.14	2.31	23.11	189.61	90%	
4	171.00	460	413	1.09	51.23	0.51	5.12	176.12	83%	
5	171.00	458	226	1.03	238.96	2.39	23.90	194.90	92%	
6	171.00	431	202	1.13	258.77	2.59	25.88	196.88	93%	
7	172.50	450	203	1.03	254.41	2.54	25.44	197.94	94%	
8	177.00	445	202	1.15	279.45	2.79	27.95	204.95	97%	
9	183.00	438	202	0.96	226.56	2.27	22.66	205.66	97%	
10	183.00	439	203	1.11	261.96	2.62	26.20	209.20	99%	
11	183.00	449	152	1.11	329.67	3.30	32.97	215.97	102%	
12	183.00	438	152	1.10	314.60	3.15	31.46	214.46	101%	
13	183.00	438	101	0.99	333.63	3.34	33.36	216.36	102%	
14	188.00	432	113	1.10	350.90	3.51	35.09	223.09	105%	
15	188.00	444	163	0.99	278.19	2.78	27.82	215.82	102%	
16	188.00	442	282	1.09	174.40	1.74	17.44	205.44	97%	
17	198.00	447	389	1.11	64.38	0.64	6.44	204.44	97%	
18	198.00	468	271	1.11	218.67	2.19	21.87	219.87	104%	
19	198.00	439	288	1.10	166.10	1.66	16.61	214.61	101%	
20	203.00	438	388	1.06	53.00	0.53	5.30	208.30	98%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474	230	2.08	507.52	5.08	50.75	212.25	100%	
2	161.50	465	253	1.92	407.04	4.07	40.70	202.20	96%	
3	161.50	485	266	2.11	462.09	4.62	46.21	207.71	98%	
4	166.50	475	231	2.16	527.04	5.27	52.70	219.20	104%	
5	166.50	480	338	2.21	313.82	3.14	31.38	197.88	94%	
6	166.50	470	350	2.24	268.80	2.69	26.88	193.38	91%	
7	169.00	442	385	1.12	63.84	0.64	6.38	175.38	83%	
8	173.50	463	414	1.09	53.41	0.53	5.34	178.84	85%	
9	178.00	445	326	1.10	130.90	1.31	13.09	191.09	90%	
10	178.00	440	327	1.00	113.00	1.13	11.30	189.30	89%	
11	178.00	442	257	1.01	186.85	1.87	18.69	196.69	93%	
12	178.00	446	253	1.10	212.30	2.12	21.23	199.23	94%	
13	178.00	432	176	1.08	276.48	2.76	27.65	205.65	97%	
14	188.00	452	144	1.06	326.48	3.26	32.65	220.65	104%	
15	188.00	442	152	1.10	319.00	3.19	31.90	219.90	104%	
16	188.00	421	282	1.08	150.12	1.50	15.01	203.01	96%	
17	198.00	453	294	1.00	159.00	1.59	15.90	213.90	101%	
18	198.00	441	424	1.14	19.38	0.19	1.94	199.94	95%	
19	198.00	404	261	1.11	158.73	1.59	15.87	213.87	101%	
20	203.00	446	131	1.01	318.15	3.18	31.82	234.82	111%	

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 24-Mar-94

Cota de embals 212.64 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Preslon de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	381	1.31	53.71	0.54	5.37	174.87	82%
2	169.50	416	226	1.20	228.00	2.28	22.80	192.30	90%
3	169.50	438	300	1.17	161.46	1.61	16.15	185.65	87%
4	174.50	415	403	1.23	14.76	0.15	1.48	175.98	83%
5	174.50	427	219	1.22	253.76	2.54	25.38	199.88	94%
6	174.50	466	368	1.17	114.66	1.15	11.47	185.97	87%
7	175.50	441	396	1.10	49.50	0.50	4.95	180.45	85%
8	179.50	445	398	1.22	57.34	0.57	5.73	185.23	87%
9	186.00	450	285	1.11	183.15	1.83	18.32	204.32	96%
10	186.00	432	284	1.21	179.08	1.79	17.91	203.91	96%
11	186.00	468	225	1.22	296.46	2.96	29.65	215.65	101%
12	186.00	450	222	1.15	262.20	2.62	26.22	212.22	100%
13	186.00	430	156	1.01	276.74	2.77	27.67	213.67	100%
14	191.00	449	86	0.95	344.85	3.45	34.49	225.49	106%
15	191.00	441	220	0.99	218.79	2.19	21.88	212.88	100%
16	191.00	470	313	1.09	171.13	1.71	17.11	208.11	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	294	1.13	171.76	1.72	17.18	218.18	103%
19	201.00	420	312	1.00	108.00	1.08	10.80	211.80	100%
20	206.00	437	312	1.13	141.25	1.41	14.13	220.13	104%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	187	1.07	280.34	2.80	28.03	194.53	91%
2	166.50	466	187	0.93	259.47	2.59	25.95	192.45	91%
3	166.50	448	186	0.91	238.42	2.38	23.84	190.34	90%
4	171.00	460	412	1.09	52.32	0.52	5.23	176.23	83%
5	171.00	458	219	1.03	246.17	2.46	24.62	195.62	92%
6	171.00	431	198	1.13	263.29	2.63	26.33	197.33	93%
7	172.50	450	194	1.03	263.68	2.64	26.37	198.87	94%
8	177.00	445	194	1.15	288.65	2.89	28.87	205.87	97%
9	183.00	438	195	0.96	233.28	2.33	23.33	206.33	97%
10	183.00	439	194	1.11	271.95	2.72	27.20	210.20	99%
11	183.00	449	146	1.11	336.33	3.36	33.63	216.63	102%
12	183.00	438	143	1.10	324.50	3.25	32.45	215.45	101%
13	183.00	438	93	0.99	341.55	3.42	34.16	217.16	102%
14	188.00	432	106	1.10	358.60	3.59	35.86	223.86	105%
15	188.00	444	158	0.99	283.14	2.83	28.31	216.31	102%
16	188.00	442	280	1.09	176.58	1.77	17.66	205.66	97%
17	198.00	447	389	1.11	64.38	0.64	6.44	204.44	96%
18	198.00	468	269	1.11	220.89	2.21	22.09	220.09	104%
19	198.00	439	285	1.10	189.40	1.69	16.94	214.94	101%
20	203.00	438	389	1.06	51.94	0.52	5.19	208.19	98%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	226	2.08	515.84	5.16	51.58	213.08	100%
2	161.50	465	247	1.92	418.56	4.19	41.86	203.36	96%
3	161.50	485	259	2.11	476.86	4.77	47.69	209.19	98%
4	166.50	475	226	2.16	537.84	5.38	53.78	220.28	104%
5	166.50	480	329	2.21	333.71	3.34	33.37	199.87	94%
6	166.50	470	345	2.24	280.00	2.80	28.00	194.50	91%
7	169.00	442	386	1.12	62.72	0.63	6.27	175.27	82%
8	173.50	463	411	1.09	56.68	0.57	5.67	179.17	84%
9	178.00	445	324	1.10	133.10	1.33	13.31	191.31	90%
10	178.00	440	324	1.00	116.00	1.16	11.60	189.60	89%
11	178.00	442	250	1.01	193.92	1.94	19.39	197.39	93%
12	178.00	446	249	1.10	216.70	2.17	21.67	199.67	94%
13	178.00	432	168	1.08	285.12	2.85	28.51	206.51	97%
14	188.00	452	135	1.06	336.02	3.36	33.60	221.60	104%
15	188.00	442	145	1.10	326.70	3.27	32.67	220.67	104%
16	188.00	421	277	1.08	155.52	1.56	15.55	203.55	96%
17	198.00	453	290	1.00	163.00	1.63	16.30	214.30	101%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	94%
19	198.00	404	258	1.11	162.06	1.62	16.21	214.21	101%
20	203.00	446	123	1.01	326.23	3.26	32.62	235.62	111%



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **04-Abr-94**  
Cota de embals: 213.34 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	381	1.31	53.71	0.54	5.37	174.87	82%
2	169.50	416	218	1.20	237.60	2.38	23.76	193.26	91%
3	169.50	438	295	1.17	167.31	1.67	16.73	186.23	87%
4	174.50	415	404	1.23	13.53	0.14	1.35	175.85	82%
5	174.50	427	213	1.22	261.08	2.61	26.11	200.61	94%
6	174.50	466	362	1.17	121.68	1.22	12.17	186.67	87%
7	175.50	441	396	1.10	49.50	0.50	4.95	180.45	85%
8	179.50	445	393	1.22	63.44	0.63	6.34	185.84	87%
9	186.00	450	280	1.11	188.70	1.89	18.87	204.87	96%
10	186.00	432	280	1.21	183.92	1.84	18.39	204.39	96%
11	186.00	468	218	1.22	305.00	3.05	30.50	216.50	101%
12	186.00	450	216	1.15	269.10	2.69	26.91	212.91	100%
13	186.00	430	151	1.01	281.79	2.82	28.18	214.18	100%
14	191.00	449	82	0.95	348.65	3.49	34.87	225.87	106%
15	191.00	441	216	0.99	222.75	2.23	22.28	213.28	100%
16	191.00	470	311	1.09	173.31	1.73	17.33	208.33	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	274	1.13	194.36	1.94	19.44	220.44	103%
19	201.00	420	310	1.00	110.00	1.10	11.00	212.00	99%
20	206.00	437	312	1.13	141.25	1.41	14.13	220.13	103%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	180	1.07	287.83	2.88	28.78	195.28	92%
2	166.50	466	182	0.93	264.12	2.64	26.41	192.91	90%
3	166.50	448	181	0.91	242.97	2.43	24.30	190.80	89%
4	171.00	460	411	1.09	53.41	0.53	5.34	176.34	83%
5	171.00	458	213	1.03	252.35	2.52	25.24	196.24	92%
6	171.00	431	191	1.13	271.20	2.71	27.12	198.12	93%
7	172.50	450	189	1.03	268.83	2.69	26.88	199.38	93%
8	177.00	445	189	1.15	294.40	2.94	29.44	206.44	97%
9	183.00	438	188	0.96	240.00	2.40	24.00	207.00	97%
10	183.00	439	189	1.11	277.50	2.78	27.75	210.75	99%
11	183.00	449	137	1.11	346.32	3.46	34.63	217.63	102%
12	183.00	438	135	1.10	333.30	3.33	33.33	216.33	101%
13	183.00	438	87	0.99	347.49	3.47	34.75	217.75	102%
14	188.00	432	100	1.10	365.20	3.65	36.52	224.52	105%
15	188.00	444	155	0.99	286.11	2.86	28.61	216.61	102%
16	188.00	442	277	1.09	179.85	1.80	17.99	205.99	97%
17	198.00	447	388	1.11	65.49	0.65	6.55	204.55	96%
18	198.00	468	266	1.11	224.22	2.24	22.42	220.42	103%
19	198.00	439	281	1.10	173.80	1.74	17.38	215.38	101%
20	203.00	438	389	1.06	51.94	0.52	5.19	208.19	98%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	223	2.08	522.08	5.22	52.21	213.71	100%
2	161.50	465	242	1.92	428.16	4.28	42.82	204.32	96%
3	161.50	485	253	2.11	489.52	4.90	48.95	210.45	99%
4	166.50	475	223	2.16	544.32	5.44	54.43	220.93	104%
5	166.50	480	323	2.21	346.97	3.47	34.70	201.20	94%
6	166.50	470	343	2.24	284.48	2.84	28.45	194.95	91%
7	169.00	442	386	1.12	62.72	0.63	6.27	175.27	82%
8	173.50	463	405	1.09	63.22	0.63	6.32	179.82	84%
9	178.00	445	324	1.10	133.10	1.33	13.31	191.31	90%
10	178.00	440	324	1.00	116.00	1.16	11.60	189.60	89%
11	178.00	442	248	1.01	195.94	1.96	19.59	197.59	93%
12	178.00	446	245	1.10	221.10	2.21	22.11	200.11	94%
13	178.00	432	163	1.08	290.52	2.91	29.05	207.05	97%
14	188.00	452	128	1.06	343.44	3.43	34.34	222.34	104%
15	188.00	442	136	1.10	336.60	3.37	33.66	221.66	104%
16	188.00	421	275	1.08	157.68	1.58	15.77	203.77	96%
17	198.00	453	287	1.00	166.00	1.66	16.60	214.60	101%
18	198.00	441	418	1.14	26.22	0.26	2.62	200.62	94%
19	198.00	404	257	1.11	163.17	1.63	16.32	214.32	100%
20	203.00	446	117	1.01	332.29	3.32	33.23	236.23	111%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 14-Abr-94

Cota de embalse 213.27 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
0+350										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										0+850
1	166.50	449	184	1.07	283.55	2.84	28.36	194.86	91%	
2	166.50	466	183	0.93	263.19	2.63	26.32	192.82	90%	
3	166.50	448	183	0.91	241.15	2.41	24.12	190.62	89%	
4	171.00	460	413	1.09	51.23	0.51	5.12	176.12	83%	
5	171.00	458	215	1.03	250.29	2.50	25.03	196.03	92%	
6	171.00	431	192	1.13	270.07	2.70	27.01	198.01	93%	
7	172.50	450	191	1.03	266.77	2.67	26.68	199.18	93%	
8	177.00	445	190	1.15	293.25	2.93	29.33	206.33	97%	
9	183.00	438	190	0.96	238.08	2.38	23.81	206.81	97%	
10	183.00	439	190	1.11	276.39	2.76	27.64	210.64	99%	
11	183.00	449	138	1.11	345.21	3.45	34.52	217.52	102%	
12	183.00	438	137	1.10	331.10	3.31	33.11	216.11	101%	
13	183.00	438	88	0.99	346.50	3.47	34.65	217.65	102%	
14	188.00	432	101	1.10	364.10	3.64	36.41	224.41	105%	
15	188.00	444	156	0.99	285.12	2.85	28.51	216.51	102%	
16	188.00	442	280	1.09	176.58	1.77	17.66	205.66	96%	
17	198.00	447	391	1.11	62.16	0.62	6.22	204.22	96%	
18	198.00	468	267	1.11	223.11	2.23	22.31	220.31	103%	
19	198.00	439	281	1.10	173.80	1.74	17.38	215.38	101%	
20	203.00	438	391	1.06	49.82	0.50	4.98	207.98	98%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										1+850
1	161.50	474	225	2.08	517.92	5.18	51.79	213.29	100%	
2	161.50	465	242	1.92	428.16	4.28	42.82	204.32	96%	
3	161.50	485	254	2.11	487.41	4.87	48.74	210.24	99%	
4	166.50	475	224	2.16	542.16	5.42	54.22	220.72	103%	
5	166.50	480	324	2.21	344.76	3.45	34.48	200.98	94%	
6	166.50	470	344	2.24	282.24	2.82	28.22	194.72	91%	
7	169.00	442	389	1.12	59.36	0.59	5.94	174.94	82%	
8	173.50	463	405	1.09	63.22	0.63	6.32	179.82	84%	
9	178.00	445	325	1.10	132.00	1.32	13.20	191.20	90%	
10	178.00	440	325	1.00	115.00	1.15	11.50	189.50	89%	
11	178.00	442	249	1.01	194.93	1.95	19.49	197.49	93%	
12	178.00	446	248	1.10	217.80	2.18	21.78	199.78	94%	
13	178.00	432	164	1.08	289.44	2.89	28.94	206.94	97%	
14	188.00	452	129	1.06	342.38	3.42	34.24	222.24	104%	
15	188.00	442	136	1.10	336.60	3.37	33.66	221.66	104%	
16	188.00	421	276	1.08	156.60	1.57	15.66	203.66	95%	
17	198.00	453	288	1.00	165.00	1.65	16.50	214.50	101%	
18	198.00	441	421	1.14	22.80	0.23	2.28	200.28	94%	
19	198.00	404	260	1.11	159.84	1.60	15.98	213.98	100%	
20	203.00	446	118	1.01	331.28	3.31	33.13	236.13	111%	

**Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones**

Fecha: **24-Abr-94**  
Cota de embals 213.2 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	382	1.31	52.40	0.52	5.24	174.74	82%	
2	169.50	416	220	1.20	235.20	2.35	23.52	193.02	91%	
3	169.50	438	293	1.17	169.65	1.70	16.97	186.47	87%	
4	174.50	415	405	1.23	12.30	0.12	1.23	175.73	82%	
5	174.50	427	214	1.22	259.86	2.60	25.99	200.49	94%	
6	174.50	466	360	1.17	124.02	1.24	12.40	186.90	88%	
7	175.50	441	397	1.10	48.40	0.48	4.84	180.34	85%	
8	179.50	445	392	1.22	64.66	0.65	6.47	185.97	87%	
9	186.00	450	281	1.11	187.59	1.88	18.76	204.76	96%	
10	186.00	432	281	1.21	182.71	1.83	18.27	204.27	96%	
11	186.00	468	218	1.22	305.00	3.05	30.50	216.50	102%	
12	186.00	450	216	1.15	269.10	2.69	26.91	212.91	100%	
13	186.00	430	154	1.01	278.76	2.79	27.88	213.88	100%	
14	191.00	449	82	0.95	348.65	3.49	34.87	225.87	106%	
15	191.00	441	217	0.99	221.76	2.22	22.18	213.18	100%	
16	191.00	470	311	1.09	173.31	1.73	17.33	208.33	98%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	274	1.13	194.36	1.94	19.44	220.44	103%	
19	201.00	420	310	1.00	110.00	1.10	11.00	212.00	99%	
20	206.00	437	311	1.13	142.38	1.42	14.24	220.24	103%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449		1.07						
2	166.50	466		0.93						
3	166.50	448		0.91						
4	171.00	460		1.09						
5	171.00	458		1.03						
6	171.00	431		1.13						
7	172.50	450		1.03						
8	177.00	445		1.15						
9	183.00	438		0.96						
10	183.00	439		1.11						
11	183.00	449		1.11						
12	183.00	438		1.10						
13	183.00	438		0.99						
14	188.00	432		1.10						
15	188.00	444		0.99						
16	188.00	442		1.09						
17	198.00	447		1.11						
18	198.00	468		1.11						
19	198.00	439		1.10						
20	203.00	438		1.06						

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 04-May-94  
 Cota de embals: 213.25 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449		1.07					
2	166.50	466		0.93					
3	166.50	448		0.91					
4	171.00	460		1.09					
5	171.00	458		1.03					
6	171.00	431		1.13					
7	172.50	450		1.03					
8	177.00	445		1.15					
9	183.00	438		0.96					
10	183.00	439		1.11					
11	183.00	449		1.11					
12	183.00	438		1.10					
13	183.00	438		0.99					
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444		0.99					
16	188.00	442		1.09					
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439		1.10					
20	203.00	438		1.06					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	382	2.08	191.36	1.91	19.14	180.64	85%
2	161.50	465	240	1.92	432.00	4.32	43.20	204.70	96%
3	161.50	485	252	2.11	491.63	4.92	49.16	210.66	99%
4	166.50	475	224	2.16	542.16	5.42	54.22	220.72	104%
5	166.50	480	324	2.21	344.76	3.45	34.48	200.98	94%
6	166.50	470	343	2.24	284.48	2.84	28.45	194.95	91%
7	169.00	442	388	1.12	60.48	0.60	6.05	175.05	82%
8	173.50	463	398	1.09	70.85	0.71	7.09	180.59	85%
9	178.00	445	325	1.10	132.00	1.32	13.20	191.20	90%
10	178.00	440	326	1.00	114.00	1.14	11.40	189.40	89%
11	178.00	442	247	1.01	196.95	1.97	19.70	197.70	93%
12	178.00	446	247	1.10	218.90	2.19	21.89	199.89	94%
13	178.00	432	163	1.08	290.52	2.91	29.05	207.05	97%
14	188.00	452	129	1.06	342.38	3.42	34.24	222.24	104%
15	188.00	442	136	1.10	336.60	3.37	33.66	221.66	104%
16	188.00	421	276	1.08	156.60	1.57	15.66	203.66	96%
17	198.00	453	289	1.00	164.00	1.64	16.40	214.40	101%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	94%
19	198.00	404	260	1.11	159.84	1.60	15.98	213.98	100%
20	203.00	446	119	1.01	330.27	3.30	33.03	236.03	111%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 14-May-94

Cota de embals 213.33 ms.n.m  
 Cota de Referencia 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
0+350									
1	169.50	422		1.31					
2	169.50	416		1.20					
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415		1.23					
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466		1.17					
7	175.50	441		1.10					
8	179.50	445		1.22					
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432		1.21					
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470		1.09					
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420		1.00					
20	206.00	437		1.13					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	182	1.07	285.69	2.86	28.57	195.07	91%
2	166.50	466	182	0.93	264.12	2.64	26.41	192.91	90%
3	166.50	448	182	0.91	242.06	2.42	24.21	190.71	89%
4	171.00	460	407	1.09	57.77	0.58	5.78	176.78	83%
5	171.00	458	217	1.03	248.23	2.48	24.82	195.82	92%
6	171.00	431	190	1.13	272.33	2.72	27.23	198.23	93%
7	172.50	450	190	1.03	267.80	2.68	26.78	199.28	93%
8	177.00	445	190	1.15	293.25	2.93	29.33	206.33	97%
9	183.00	438	190	0.96	238.08	2.38	23.81	206.81	97%
10	183.00	439	189	1.11	277.50	2.78	27.75	210.75	99%
11	183.00	449	137	1.11	346.32	3.46	34.63	217.63	102%
12	183.00	438	136	1.10	332.20	3.32	33.22	216.22	101%
13	183.00	438	88	0.99	346.50	3.47	34.65	217.65	102%
14	188.00	432	102	1.10	363.00	3.63	36.30	224.30	105%
15	188.00	444	151	0.99	290.07	2.90	29.01	217.01	102%
16	188.00	442	279	1.09	177.67	1.78	17.77	205.77	96%
17	198.00	447	390	1.11	63.27	0.63	6.33	204.33	96%
18	198.00	468	258	1.11	233.10	2.33	23.31	221.31	104%
19	198.00	439	274	1.10	181.50	1.82	18.15	216.15	101%
20	203.00	438	391	1.06	49.82	0.50	4.98	207.98	97%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	380	2.08	195.52	1.96	19.55	181.05	85%
2	161.50	465	240	1.92	432.00	4.32	43.20	204.70	96%
3	161.50	485	251	2.11	493.74	4.94	49.37	210.87	99%
4	166.50	475	223	2.16	544.32	5.44	54.43	220.93	104%
5	166.50	480	323	2.21	346.97	3.47	34.70	201.20	94%
6	166.50	470	341	2.24	288.96	2.89	28.90	195.40	92%
7	169.00	442	388	1.12	60.48	0.60	6.05	175.05	82%
8	173.50	463	396	1.09	73.03	0.73	7.30	180.80	85%
9	178.00	445	325	1.10	132.00	1.32	13.20	191.20	90%
10	178.00	440	325	1.00	115.00	1.15	11.50	189.50	89%
11	178.00	442	247	1.01	196.95	1.97	19.70	197.70	93%
12	178.00	446	247	1.10	218.90	2.19	21.89	199.89	94%
13	178.00	432	163	1.08	290.52	2.91	29.05	207.05	97%
14	188.00	452	128	1.06	343.44	3.43	34.34	222.34	104%
15	188.00	442	135	1.10	337.70	3.38	33.77	221.77	104%
16	188.00	421	275	1.08	157.68	1.58	15.77	203.77	96%
17	198.00	453	288	1.00	165.00	1.65	16.50	214.50	101%
18	198.00	441	423	1.14	20.52	0.21	2.05	200.05	94%
19	198.00	404	259	1.11	160.95	1.61	16.10	214.10	100%
20	203.00	446	118	1.01	331.28	3.31	33.13	236.13	111%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **24-May-94**  
 Cota de embals 213.31 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	378	1.31	57.64	0.58	5.76	175.26	82%
2	169.50	416	217	1.20	238.80	2.39	23.88	193.38	91%
3	169.50	438	290	1.17	173.16	1.73	17.32	186.82	88%
4	174.50	415	404	1.23	13.53	0.14	1.35	175.85	82%
5	174.50	427	213	1.22	261.08	2.61	26.11	200.61	94%
6	174.50	466	355	1.17	129.87	1.30	12.99	187.49	88%
7	175.50	441	394	1.10	51.70	0.52	5.17	180.67	85%
8	179.50	445	388	1.22	69.54	0.70	6.95	186.45	87%
9	186.00	450	278	1.11	190.92	1.91	19.09	205.09	96%
10	186.00	432	278	1.21	186.34	1.86	18.63	204.63	96%
11	186.00	468	216	1.22	307.44	3.07	30.74	216.74	102%
12	186.00	450	216	1.15	269.10	2.69	26.91	212.91	100%
13	186.00	430	154	1.01	278.76	2.79	27.88	213.88	100%
14	191.00	449	81	0.95	349.60	3.50	34.96	225.96	106%
15	191.00	441	216	0.99	222.75	2.23	22.28	213.28	100%
16	191.00	470	306	1.09	178.76	1.79	17.88	208.88	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	274	1.13	194.36	1.94	19.44	220.44	103%
19	201.00	420	305	1.00	115.00	1.15	11.50	212.50	100%
20	206.00	437	305	1.13	149.16	1.49	14.92	220.92	104%

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449		1.07					
2	166.50	466		0.93					
3	166.50	448		0.91					
4	171.00	460		1.09					
5	171.00	458		1.03					
6	171.00	431		1.13					
7	172.50	450		1.03					
8	177.00	445		1.15					
9	183.00	438		0.96					
10	183.00	439		1.11					
11	183.00	449		1.11					
12	183.00	438		1.10					
13	183.00	438		0.99					
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444		0.99					
16	188.00	442		1.09					
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439		1.10					
20	203.00	438		1.06					

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	378	2.08	199.68	2.00	19.97	181.47	85%
2	161.50	465	239	1.92	433.92	4.34	43.39	204.89	96%
3	161.50	485	250	2.11	495.85	4.96	49.59	211.09	99%
4	166.50	475	222	2.16	546.48	5.46	54.65	221.15	104%
5	166.50	480	322	2.21	349.18	3.49	34.92	201.42	94%
6	166.50	470	339	2.24	293.44	2.93	29.34	195.84	92%
7	169.00	442	387	1.12	61.60	0.62	6.16	175.16	82%
8	173.50	463	394	1.09	75.21	0.75	7.52	181.02	85%
9	178.00	445	324	1.10	133.10	1.33	13.31	191.31	90%
10	178.00	440	324	1.00	116.00	1.16	11.60	189.60	89%
11	178.00	442	246	1.01	197.96	1.98	19.80	197.80	93%
12	178.00	446	246	1.10	220.00	2.20	22.00	200.00	94%
13	178.00	432	162	1.08	291.60	2.92	29.16	207.16	97%
14	188.00	452	127	1.06	344.50	3.45	34.45	222.45	104%
15	188.00	442	134	1.10	338.80	3.39	33.88	221.88	104%
16	188.00	421	274	1.08	158.76	1.59	15.88	203.88	96%
17	198.00	453	287	1.00	166.00	1.66	16.60	214.60	101%
18	198.00	441	422	1.14	21.66	0.22	2.17	200.17	94%
19	198.00	404	258	1.11	162.06	1.62	16.21	214.21	100%
20	203.00	446	117	1.01	332.29	3.32	33.23	236.23	111%

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **20-Jun-94**  
 Cota de embals 212.46 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>										
1	169.50	422		1.31						
2	169.50	416		1.20						
3	169.50	438		1.17						
4	174.50	415		1.23						
5	174.50	427		1.22						
6	174.50	466		1.17						
7	175.50	441		1.10						
8	179.50	445		1.22						
9	186.00	450		1.11						
10	186.00	432		1.21						
11	186.00	468		1.22						
12	186.00	450		1.15						
13	186.00	430		1.01						
14	191.00	449		0.95						
15	191.00	441		0.99						
16	191.00	470		1.09						
17	201.00	449		1.15						
18	201.00	446		1.13						
19	201.00	420		1.00						
20	206.00	437		1.13						

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	315	1.07	143.38	1.43	14.34	180.84	85%	
2	166.50	466	180	0.93	265.98	2.66	26.60	193.10	91%	
3	166.50	448	182	0.91	242.06	2.42	24.21	190.71	90%	
4	171.00	460	179	1.09	306.29	3.06	30.63	201.63	95%	
5	171.00	458	220	1.03	245.14	2.45	24.51	195.51	92%	
6	171.00	431	-	1.13						
7	172.50	450	187	1.03	270.89	2.71	27.09	199.59	94%	
8	177.00	445	145	1.15	345.00	3.45	34.50	211.50	100%	
9	183.00	438	190	0.96	238.08	2.38	23.81	206.81	97%	
10	183.00	439	192	1.11	274.17	2.74	27.42	210.42	99%	
11	183.00	449	145	1.11	337.44	3.37	33.74	216.74	102%	
12	183.00	438	137	1.10	331.10	3.31	33.11	216.11	102%	
13	183.00	438	85	0.99	349.47	3.49	34.95	217.95	103%	
14	188.00	432	103	1.10	361.90	3.62	36.19	224.19	106%	
15	188.00	444	145	0.99	296.01	2.96	29.60	217.60	102%	
16	188.00	442	260	1.09	198.38	1.98	19.84	207.84	98%	
17	198.00	447	385	1.11	68.82	0.69	6.88	204.88	96%	
18	198.00	468	250	1.11	241.98	2.42	24.20	222.20	105%	
19	198.00	439	265	1.10	191.40	1.91	19.14	217.14	102%	
20	203.00	438	390	1.06	50.88	0.51	5.09	208.09	98%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **27-Jun-94**  
 Cota de embals 212.24 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros				Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)			
<b>0+350</b>										
1	169.50	422	210	1.31	277.72	2.78	27.77	197.27	93%	
2	169.50	416	220	1.20	235.20	2.35	23.52	193.02	91%	
3	169.50	438	280	1.17	184.86	1.85	18.49	187.99	89%	
4	174.50	415	215	1.23	246.00	2.46	24.60	199.10	94%	
5	174.50	427	214	1.22	259.86	2.60	25.99	200.49	94%	
6	174.50	466	350	1.17	135.72	1.36	13.57	188.07	89%	
7	175.50	441	385	1.10	61.60	0.62	6.16	181.66	86%	
8	179.50	445	384	1.22	74.42	0.74	7.44	186.94	88%	
9	186.00	450	382	1.11	75.48	0.75	7.55	193.55	91%	
10	186.00	432	280	1.21	183.92	1.84	18.39	204.39	96%	
11	186.00	468	220	1.22	302.56	3.03	30.26	216.26	102%	
12	186.00	450	215	1.15	270.25	2.70	27.03	213.03	100%	
13	186.00	430	155	1.01	277.75	2.78	27.78	213.78	101%	
14	191.00	449	80	0.95	350.55	3.51	35.06	226.06	107%	
15	191.00	441	215	0.99	223.74	2.24	22.37	213.37	101%	
16	191.00	470	132	1.09	368.42	3.68	36.84	227.84	107%	
17	201.00	449	-	1.15						
18	201.00	446	299	1.13	166.11	1.66	16.61	217.61	103%	
19	201.00	420	305	1.00	115.00	1.15	11.50	212.50	100%	
20	206.00	437	190	1.13	279.11	2.79	27.91	233.91	110%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>0+850</b>
1	166.50	449	310	1.07	148.73	1.49	14.87	181.37	85%	
2	166.50	466	182	0.93	264.12	2.64	26.41	192.91	91%	
3	166.50	448	180	0.91	243.88	2.44	24.39	190.89	90%	
4	171.00	460	397	1.09	68.67	0.69	6.87	177.87	84%	
5	171.00	458	220	1.03	245.14	2.45	24.51	195.51	92%	
6	171.00	431	-	1.13						
7	172.50	450	-	1.03						
8	177.00	445	187	1.15	296.70	2.97	29.67	206.67	97%	
9	183.00	438	190	0.96	238.08	2.38	23.81	206.81	97%	
10	183.00	439	190	1.11	276.39	2.76	27.64	210.64	99%	
11	183.00	449	140	1.11	342.99	3.43	34.30	217.30	102%	
12	183.00	438	137	1.10	331.10	3.31	33.11	216.11	102%	
13	183.00	438	90	0.99	344.52	3.45	34.45	217.45	102%	
14	188.00	432	100	1.10	365.20	3.65	36.52	224.52	106%	
15	188.00	444	150	0.99	291.06	2.91	29.11	217.11	102%	
16	188.00	442	245	1.09	214.73	2.15	21.47	209.47	99%	
17	198.00	447	385	1.11	68.82	0.69	6.88	204.88	97%	
18	198.00	468	245	1.11	247.53	2.48	24.75	222.75	105%	
19	198.00	439	265	1.10	191.40	1.91	19.14	217.14	102%	
20	203.00	438	390	1.06	50.88	0.51	5.09	208.09	98%	

Piezómetro	Elevación Esti m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje	
										<b>1+850</b>
1	161.50	474		2.08						
2	161.50	465		1.92						
3	161.50	485		2.11						
4	166.50	475		2.16						
5	166.50	480		2.21						
6	166.50	470		2.24						
7	169.00	442		1.12						
8	173.50	463		1.09						
9	178.00	445		1.10						
10	178.00	440		1.00						
11	178.00	442		1.01						
12	178.00	446		1.10						
13	178.00	432		1.08						
14	188.00	452		1.06						
15	188.00	442		1.10						
16	188.00	421		1.08						
17	198.00	453		1.00						
18	198.00	441		1.14						
19	198.00	404		1.11						
20	203.00	446		1.01						



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 18-Sep-99

Cota de embals: 210 ms.n.m  
 Aguas abajo: 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
0+350									
1	169.50	422	271	1.31	197.81	1.98	19.78	189.28	90%
2	169.50	416	218	1.20	237.60	2.38	23.76	193.26	92%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	236	1.23	220.17	2.20	22.02	196.52	94%
5	174.50	427	-	1.22					
6	174.50	466	351	1.17	134.55	1.35	13.46	187.96	90%
7	175.50	441	330	1.10	122.10	1.22	12.21	187.71	89%
8	179.50	445	263	1.22	222.04	2.22	22.20	201.70	96%
9	186.00	450	-	1.11					
10	186.00	432	321	1.21	134.31	1.34	13.43	199.43	95%
11	186.00	468	-	1.22					
12	186.00	450	-	1.15					
13	186.00	430	-	1.01					
14	191.00	449	-	0.95					
15	191.00	441	-	0.99					
16	191.00	470	370	1.09	109.00	1.09	10.90	201.90	96%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	-	1.13					
19	201.00	420	405	1.00	15.00	0.15	1.50	202.50	96%
20	206.00	437	394	1.13	48.59	0.49	4.86	210.86	100%

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	312	1.07	146.59	1.47	14.66	181.16	86%
2	166.50	466	124	0.93	318.06	3.18	31.81	198.31	94%
3	166.50	448	213	0.91	213.85	2.14	21.39	187.89	89%
4	171.00	460	264	1.09	213.64	2.14	21.36	192.36	92%
5	171.00	458	195	1.03	270.89	2.71	27.09	198.09	94%
6	171.00	431	186	1.13	276.85	2.77	27.69	198.69	95%
7	172.50	450	232	1.03	224.54	2.25	22.45	194.95	93%
8	177.00	445	367	1.15	89.70	0.90	8.97	185.97	89%
9	183.00	438	263	0.96	168.00	1.68	16.80	199.80	95%
10	183.00	439	265	1.11	193.14	1.93	19.31	202.31	96%
11	183.00	449	270	1.11	198.69	1.99	19.87	202.87	97%
12	183.00	438	295	1.10	157.30	1.57	15.73	198.73	95%
13	183.00	438	391	0.99	46.53	0.47	4.65	187.65	89%
14	188.00	432	-	1.10				188.00	
15	188.00	444	440	0.99	3.96	0.04	0.40	188.40	90%
16	188.00	442	370	1.09	78.48	0.78	7.85	195.85	93%
17	198.00	447	-	1.11					
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	320	1.10	130.90	1.31	13.09	211.09	101%
20	203.00	438	418	1.06	21.20	0.21	2.12	205.12	98%

Piezómetro	Elevación Estil m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	357.76	3.58	35.78	197.28	94%
2	161.50	465	286	1.92	343.68	3.44	34.37	195.87	93%
3	161.50	485	354	2.11	276.41	2.76	27.64	189.14	90%
4	166.50	475	326	2.16	321.84	3.22	32.18	198.68	95%
5	166.50	480	335	2.21	320.45	3.20	32.05	198.55	95%
6	166.50	470	236	2.24	524.16	5.24	52.42	218.92	104%
7	169.00	442	302	1.12	156.80	1.57	15.68	184.68	88%
8	173.50	463	223	1.09	261.60	2.62	26.16	199.66	95%
9	178.00	445	249	1.10	215.60	2.16	21.56	199.56	95%
10	178.00	440	209	1.00	231.00	2.31	23.10	201.10	96%
11	178.00	442	426	1.01	16.16	0.16	1.62	179.62	86%
12	178.00	446	413	1.10	36.30	0.36	3.63	181.63	86%
13	178.00	432	-	1.08					
14	188.00	452	311	1.06	149.46	1.49	14.95	202.95	97%
15	188.00	442	316	1.10	138.60	1.39	13.86	201.86	96%
16	188.00	421	393	1.08	30.24	0.30	3.02	191.02	91%
17	198.00	453	-	1.00					
18	198.00	441	-	1.14					
19	198.00	404	-	1.11					
20	203.00	446	-	1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Malhak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **01-Feb-00**  
Cota de emba 202 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	315	1.31	140.17	1.40	14.02	183.52	91%
2	169.50	416	201	1.20	258.00	2.58	25.80	195.30	97%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	283	1.23	162.36	1.62	16.24	190.74	94%
5	174.50	427	-	1.22					
6	174.50	466	414	1.17	60.84	0.81	6.08	180.58	89%
7	175.50	441	330	1.10	122.10	1.22	12.21	187.71	93%
8	179.50	445	278	1.22	203.74	2.04	20.37	199.87	99%
9	186.00	450	-	1.11					
10	186.00	432	331	1.21	122.21	1.22	12.22	198.22	98%
11	186.00	468	-	1.22					
12	186.00	450	-	1.15					
13	186.00	430	-	1.01					
14	191.00	449	-	0.95					
15	191.00	441	-	0.99					
16	191.00	470	408	1.09	67.58	0.68	6.76	197.76	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	-	1.13					
19	201.00	420	404	1.00	16.00	0.16	1.60	202.60	100%
20	206.00	437	400	1.13	41.81	0.42	4.18	210.18	104%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+850</b>									
1	166.50	449	374	1.07	80.25	0.80	8.03	174.53	86%
2	166.50	466	213	0.93	235.29	2.35	23.53	190.03	94%
3	166.50	448	222	0.91	205.66	2.06	20.57	187.07	93%
4	171.00	460	339	1.09	131.89	1.32	13.19	184.19	91%
5	171.00	458	263	1.03	200.85	2.01	20.09	191.09	95%
6	171.00	431	264	1.13	188.71	1.89	18.87	189.87	94%
7	172.50	450	257	1.03	198.79	1.99	19.88	192.38	95%
8	177.00	445	433	1.15	13.80	0.14	1.38	178.38	88%
9	183.00	438	332	0.96	101.76	1.02	10.18	193.18	96%
10	183.00	439	310	1.11	143.19	1.43	14.32	197.32	98%
11	183.00	449	338	1.11	123.21	1.23	12.32	195.32	97%
12	183.00	438	290	1.10	162.80	1.63	16.28	199.28	99%
13	183.00	438	389	0.99	48.51	0.49	4.85	187.85	93%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	406	0.99	37.62	0.38	3.76	191.76	95%
16	188.00	442	410	1.09	34.88	0.35	3.49	191.49	95%
17	198.00	447	-	1.11					
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	327	1.10	123.20	1.23	12.32	210.32	104%
20	203.00	438	418	1.06	21.20	0.21	2.12	205.12	102%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>1+850</b>									
1	161.50	474	338	2.08	282.88	2.83	28.29	189.79	94%
2	161.50	465	325	1.92	268.80	2.69	26.88	188.38	93%
3	161.50	485	377	2.11	227.88	2.28	22.79	184.29	91%
4	166.50	475	360	2.16	248.40	2.48	24.84	191.34	95%
5	166.50	480	367	2.21	249.73	2.50	24.97	191.47	95%
6	166.50	470	361	2.24	244.16	2.44	24.42	190.92	95%
7	169.00	442	311	1.12	146.72	1.47	14.67	183.67	91%
8	173.50	463	277	1.09	202.74	2.03	20.27	193.77	96%
9	178.00	445	303	1.10	156.20	1.56	15.62	193.62	96%
10	178.00	440	281	1.00	159.00	1.59	15.90	193.90	96%
11	178.00	442	273	1.01	170.89	1.71	17.07	195.07	97%
12	178.00	446	416	1.10	33.00	0.33	3.30	181.30	90%
13	178.00	432	-	1.08					
14	188.00	452	382	1.06	74.20	0.74	7.42	195.42	97%
15	188.00	442	345	1.10	106.70	1.07	10.67	198.67	98%
16	188.00	421	395	1.08	28.08	0.28	2.81	190.81	94%
17	198.00	453	-	1.00					
18	198.00	441	-	1.14					
19	198.00	404	-	1.11					
20	203.00	446	-	1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **15-Mar-00**  
Cota de emba 201.903 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	301	1.31	158.51	1.59	15.85	185.35	92%
2	169.50	416	196	1.20	264.00	2.64	26.40	195.90	97%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	338	1.23	94.71	0.95	9.47	183.97	91%
5	174.50	427	-	1.22					
6	174.50	466	270	1.17	229.32	2.29	22.93	197.43	98%
7	175.50	441	365	1.10	83.60	0.84	8.36	183.86	91%
8	179.50	445	433	1.22	14.64	0.15	1.46	180.96	90%
9	186.00	450	-	1.11					
10	186.00	432	329	1.21	124.63	1.25	12.46	198.46	98%
11	186.00	468	-	1.22					
12	186.00	450	-	1.15					
13	186.00	430	-	1.01					
14	191.00	449	-	0.95					
15	191.00	441	-	0.99					
16	191.00	470	409	1.09	66.49	0.66	6.65	197.65	98%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	-	1.13					
19	201.00	420	327	1.00	93.00	0.93	9.30	210.30	104%
20	206.00	437	407	1.13	33.90	0.34	3.39	209.39	104%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	311	1.07	147.66	1.48	14.77	181.27	90%
2	166.50	466	190	0.93	256.68	2.57	25.67	192.17	95%
3	166.50	448	204	0.91	222.04	2.22	22.20	188.70	93%
4	171.00	460	322	1.09	150.42	1.50	15.04	186.04	92%
5	171.00	458	225	1.03	239.99	2.40	24.00	195.00	97%
6	171.00	431	388	1.13	48.59	0.49	4.86	175.86	87%
7	172.50	450	285	1.03	169.95	1.70	17.00	189.50	94%
8	177.00	445	385	1.15	69.00	0.69	6.90	183.90	91%
9	183.00	438	314	0.96	119.04	1.19	11.90	194.90	97%
10	183.00	439	290	1.11	165.39	1.65	16.54	199.54	99%
11	183.00	449	321	1.11	142.08	1.42	14.21	197.21	98%
12	183.00	438	298	1.10	154.00	1.54	15.40	198.40	98%
13	183.00	438	388	0.99	49.50	0.50	4.95	187.95	93%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	406	0.99	37.62	0.38	3.76	191.76	95%
16	188.00	442	417	1.09	27.25	0.27	2.73	190.73	94%
17	198.00	447	368	1.11	87.69	0.88	8.77	206.77	102%
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	341	1.10	107.80	1.08	10.78	208.78	103%
20	203.00	438	420	1.06	19.08	0.19	1.91	204.91	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	329	2.08	301.60	3.02	30.16	191.66	95%
2	161.50	465	315	1.92	288.00	2.88	28.80	190.30	94%
3	161.50	485	378	2.11	225.77	2.26	22.58	184.08	91%
4	166.50	475	351	2.16	267.84	2.68	26.78	193.28	96%
5	166.50	480	360	2.21	265.20	2.65	26.52	193.02	96%
6	166.50	470	431	2.24	87.36	0.87	8.74	175.24	87%
7	169.00	442	316	1.12	141.12	1.41	14.11	183.11	91%
8	173.50	463	304	1.09	173.31	1.73	17.33	190.83	95%
9	178.00	445	318	1.10	139.70	1.40	13.97	191.97	95%
10	178.00	440	263	1.00	177.00	1.77	17.70	195.70	97%
11	178.00	442	309	1.01	134.33	1.34	13.43	191.43	95%
12	178.00	446	425	1.10	23.10	0.23	2.31	180.31	89%
13	178.00	432	-	1.08					
14	188.00	452	361	1.06	96.46	0.96	9.65	197.65	98%
15	188.00	442	370	1.10	79.20	0.79	7.92	195.92	97%
16	188.00	421	398	1.08	24.84	0.25	2.48	190.48	94%
17	198.00	453	-	1.00					
18	198.00	441	-	1.14					
19	198.00	404	-	1.11					
20	203.00	446	-	1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **02-Jun-00**  
Cota de emba 209.103 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	257	1.31	216.15	2.16	21.62	191.12	91%
2	169.50	416	173	1.20	291.60	2.92	29.16	198.66	95%
3	169.50	438	-	1.17					
4	174.50	415	219	1.23	241.08	2.41	24.11	198.61	95%
5	174.50	427	-	1.22					
6	174.50	466	350	1.17	135.72	1.36	13.57	188.07	90%
7	175.50	441	327	1.10	125.40	1.25	12.54	188.04	90%
8	179.50	445	263	1.22	222.04	2.22	22.20	201.70	96%
9	186.00	450	-	1.11					
10	186.00	432	286	1.21	176.66	1.77	17.67	203.67	97%
11	186.00	468	-	1.22					
12	186.00	450	-	1.15					
13	186.00	430	-	1.01					
14	191.00	449	-	0.95					
15	191.00	441	-	0.99					
16	191.00	470	408	1.09	67.58	0.68	6.76	197.76	95%
17	201.00	449	-	1.15					
18	201.00	446	-	1.13					
19	201.00	420	406	1.00	14.00	0.14	1.40	202.40	97%
20	206.00	437	399	1.13	42.94	0.43	4.29	210.29	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	311	1.07	147.66	1.48	14.77	181.27	87%
2	166.50	466	123	0.93	318.99	3.19	31.90	198.40	95%
3	166.50	448	150	0.91	271.18	2.71	27.12	193.62	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.01	2.06	20.60	191.60	92%
5	171.00	458	194	1.03	271.92	2.72	27.19	198.19	95%
6	171.00	431	185	1.13	277.98	2.78	27.80	198.80	95%
7	172.50	450	237	1.03	219.39	2.19	21.94	194.44	93%
8	177.00	445	365	1.15	92.00	0.92	9.20	186.20	89%
9	183.00	438	262	0.96	168.96	1.69	16.90	199.90	96%
10	183.00	439	232	1.11	229.77	2.30	22.98	205.98	99%
11	183.00	449	268	1.11	200.91	2.01	20.09	203.09	97%
12	183.00	438	299	1.10	152.90	1.53	15.29	198.29	95%
13	183.00	438	388	0.99	49.50	0.50	4.95	187.95	90%
14	188.00	432	-	1.10					
15	188.00	444	406	0.99	37.62	0.38	3.76	191.76	92%
16	188.00	442	369	1.09	79.57	0.80	7.96	195.96	94%
17	198.00	447	-	1.11					
18	198.00	468	-	1.11					
19	198.00	439	329	1.10	121.00	1.21	12.10	210.10	100%
20	203.00	438	421	1.06	18.02	0.18	1.80	204.80	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	303	2.08	355.68	3.56	35.57	197.07	94%
2	161.50	465	286	1.92	343.68	3.44	34.37	195.87	94%
3	161.50	485	354	2.11	276.41	2.76	27.64	189.14	90%
4	166.50	475	325	2.16	324.00	3.24	32.40	198.90	95%
5	166.50	480	334	2.21	322.66	3.23	32.27	198.77	95%
6	166.50	470	430	2.24	89.60	0.90	8.96	175.46	84%
7	169.00	442	302	1.12	156.80	1.57	15.68	184.68	88%
8	173.50	463	237	1.09	246.34	2.46	24.63	198.13	95%
9	178.00	445	247	1.10	217.80	2.18	21.78	199.78	96%
10	178.00	440	208	1.00	232.00	2.32	23.20	201.20	96%
11	178.00	442	227	1.01	217.15	2.17	21.72	199.72	96%
12	178.00	446	225	1.10	243.10	2.43	24.31	202.31	97%
13	178.00	432	-	1.08					
14	188.00	452	310	1.06	150.52	1.51	15.05	203.05	97%
15	188.00	442	317	1.10	137.50	1.38	13.75	201.75	96%
16	188.00	421	399	1.08	23.76	0.24	2.38	190.38	91%
17	198.00	453	-	1.00					
18	198.00	441	-	1.14					
19	198.00	404	-	1.11					
20	203.00	446	-	1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **23-Jun-00**  
Cota de emba 209.234 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

15:00

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	257	1.31	216.26	2.16	21.63	191.13	91%
2	169.50	416	172	1.20	292.88	2.93	29.29	198.79	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	217	1.23	243.06	2.43	24.31	198.81	95%
5	174.50	427		1.22					
6	174.50	466	350	1.17	135.95	1.36	13.60	188.10	90%
7	175.50	441	324	1.10	128.58	1.29	12.86	188.36	90%
8	179.50	445	263	1.22	222.23	2.22	22.22	201.72	96%
9	186.00	450		1.11					
10	186.00	432	285	1.21	178.37	1.78	17.84	203.84	97%
11	186.00	468		1.22					
12	186.00	450		1.15					
13	186.00	430		1.01					
14	191.00	449		0.95					
15	191.00	441		0.99					
16	191.00	470	409	1.09	66.39	0.66	6.64	197.64	94%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446		1.13					
19	201.00	420	407	1.00	12.89	0.13	1.29	202.29	97%
20	206.00	437	397	1.13	44.94	0.45	4.49	210.49	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	310	1.07	148.43	1.48	14.84	181.34	87%
2	166.50	466	121	0.93	321.27	3.21	32.13	198.63	95%
3	166.50	448	150	0.91	271.00	2.71	27.10	193.60	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.28	2.06	20.63	191.63	92%
5	171.00	458	192	1.03	274.29	2.74	27.43	198.43	95%
6	171.00	431	184	1.13	279.34	2.79	27.93	198.93	95%
7	172.50	450	235	1.03	221.27	2.21	22.13	194.63	93%
8	177.00	445	366	1.15	91.30	0.91	9.13	186.13	89%
9	183.00	438	263	0.96	168.15	1.68	16.81	199.81	95%
10	183.00	439	229	1.11	232.82	2.33	23.28	206.28	99%
11	183.00	449	267	1.11	202.24	2.02	20.22	203.22	97%
12	183.00	438	296	1.10	155.71	1.56	15.57	198.57	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.14	0.50	5.01	188.01	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.47	0.38	3.85	191.85	92%
16	188.00	442	368	1.09	81.11	0.81	8.11	196.11	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	326	1.10	124.20	1.24	12.42	210.42	101%
20	203.00	438		1.06					

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	356.99	3.57	35.70	197.20	94%
2	161.50	465	285	1.92	346.40	3.46	34.64	196.14	94%
3	161.50	485	354	2.11	276.93	2.77	27.69	189.19	90%
4	166.50	475	324	2.16	325.92	3.26	32.59	199.09	95%
5	166.50	480	334	2.21	322.68	3.23	32.27	198.77	95%
6	166.50	470	419	2.24	114.30	1.14	11.43	177.93	85%
7	169.00	442	291	1.12	169.66	1.70	16.97	185.97	89%
8	173.50	463	219	1.09	265.56	2.66	26.56	200.06	96%
9	178.00	445	245	1.10	219.93	2.20	21.99	199.99	96%
10	178.00	440	208	1.00	232.49	2.32	23.25	201.25	96%
11	178.00	442	225	1.01	218.87	2.19	21.89	199.89	96%
12	178.00	446	421	1.10	27.56	0.28	2.76	180.76	86%
13	178.00	432		1.08					
14	188.00	452	308	1.06	152.32	1.52	15.23	203.23	97%
15	188.00	442	308	1.10	147.07	1.47	14.71	202.71	97%
16	188.00	421	397	1.08	25.67	0.26	2.57	190.57	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **24-Jun-00**  
Cota de emba 209,234 ms.n.m  
Aguas abajo 0 ms.n.m

08:00

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	257	1.31	216.17	2.16	21.62	191.12	91%
2	169.50	416	172	1.20	292.46	2.92	29.25	198.75	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	218	1.23	241.82	2.42	24.18	198.68	95%
5	174.50	427	225	1.22	246.29	2.46	24.63	199.13	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.82	1.36	13.58	188.08	90%
7	175.50	441	324	1.10	128.19	1.28	12.82	188.32	90%
8	179.50	445	262	1.22	223.02	2.23	22.30	201.80	96%
9	186.00	450	289	1.11	178.35	1.78	17.83	203.83	97%
10	186.00	432	285	1.21	178.30	1.78	17.83	203.83	97%
11	186.00	468	354	1.22	138.83	1.39	13.88	199.88	96%
12	186.00	450	340	1.15	126.75	1.27	12.68	198.68	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.98	0.56	5.60	191.60	92%
14	191.00	449	297	0.95	144.85	1.45	14.49	205.49	98%
15	191.00	441	336	0.99	103.88	1.04	10.39	201.39	96%
16	191.00	470	408	1.09	67.79	0.68	6.78	197.78	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	419	1.13	30.25	0.30	3.02	204.02	98%
19	201.00	420	406	1.00	13.98	0.14	1.40	202.40	97%
20	206.00	437	397	1.13	45.69	0.46	4.57	210.57	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+850</b>									
1	166.50	449	311	1.07	147.95	1.48	14.79	181.29	87%
2	166.50	466	122	0.93	320.38	3.20	32.04	198.54	95%
3	166.50	448	150	0.91	271.38	2.71	27.14	193.64	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.47	2.06	20.65	191.65	92%
5	171.00	458	192	1.03	274.02	2.74	27.40	198.40	95%
6	171.00	431	184	1.13	279.00	2.79	27.90	198.90	95%
7	172.50	450	235	1.03	221.95	2.22	22.20	194.70	93%
8	177.00	445	366	1.15	90.41	0.90	9.04	186.04	89%
9	183.00	438	261	0.96	169.88	1.70	16.99	199.99	96%
10	183.00	439	230	1.11	231.76	2.32	23.18	206.18	99%
11	183.00	449	268	1.11	200.78	2.01	20.08	203.08	97%
12	183.00	438	297	1.10	155.24	1.55	15.52	198.52	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.43	0.50	5.04	188.04	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.13	0.38	3.81	191.81	92%
16	188.00	442	368	1.09	80.68	0.81	8.07	196.07	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	325	1.10	124.93	1.25	12.49	210.49	101%
20	203.00	438	421	1.06	18.27	0.18	1.83	204.83	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
					Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>1+850</b>									
1	161.50	474	302	2.08	357.30	3.57	35.73	197.23	94%
2	161.50	465	284	1.92	346.63	3.47	34.66	196.16	94%
3	161.50	485	352	2.11	280.14	2.80	28.01	189.51	91%
4	166.50	475	324	2.16	325.10	3.25	32.51	199.01	95%
5	166.50	480	334	2.21	323.32	3.23	32.33	198.83	95%
6	166.50	470	431	2.24	87.26	0.87	8.73	175.23	84%
7	169.00	442	291	1.12	169.21	1.69	16.92	185.92	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.18	2.65	26.52	200.02	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.33	2.19	21.93	199.93	96%
10	178.00	440	206	1.00	234.18	2.34	23.42	201.42	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.06	2.19	21.91	199.91	96%
12	178.00	446	421	1.10	27.07	0.27	2.71	180.71	86%
13	178.00	432	412	1.08	21.37	0.21	2.14	180.14	86%
14	188.00	452	308	1.06	152.21	1.52	15.22	203.22	97%
15	188.00	442	306	1.10	149.55	1.50	14.95	202.95	97%
16	188.00	421	398	1.08	25.31	0.25	2.53	190.53	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 24-Jun-00

13:00

Cota de emba 209.234 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	257	1.31	216.03	2.16	21.60	191.10	91%
2	169.50	416	173	1.20	292.17	2.92	29.22	198.72	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	217	1.23	242.99	2.43	24.30	198.80	95%
5	174.50	427	226	1.22	245.72	2.46	24.57	199.07	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.64	1.36	13.56	188.06	90%
7	175.50	441	324	1.10	128.24	1.28	12.82	188.32	90%
8	179.50	445	262	1.22	222.87	2.23	22.29	201.79	96%
9	186.00	450	289	1.11	178.80	1.79	17.88	203.88	97%
10	186.00	432	285	1.21	178.31	1.78	17.83	203.83	97%
11	186.00	468	354	1.22	138.67	1.39	13.87	199.87	96%
12	186.00	450	340	1.15	126.45	1.26	12.65	198.65	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.93	0.56	5.59	191.59	92%
14	191.00	449	297	0.95	144.82	1.45	14.48	205.48	98%
15	191.00	441	336	0.99	103.65	1.04	10.36	201.36	96%
16	191.00	470	408	1.09	67.27	0.67	6.73	197.73	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	419	1.13	30.54	0.31	3.05	204.05	98%
19	201.00	420	406	1.00	13.61	0.14	1.36	202.36	97%
20	206.00	437	397	1.13	45.63	0.46	4.56	210.56	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	311	1.07	147.98	1.48	14.80	181.30	87%
2	166.50	466	121	0.93	320.41	3.20	32.04	198.54	95%
3	166.50	448	150	0.91	271.41	2.71	27.14	193.64	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.50	2.07	20.65	191.65	92%
5	171.00	458	192	1.03	274.06	2.74	27.41	198.41	95%
6	171.00	431	184	1.13	279.03	2.79	27.90	198.90	95%
7	172.50	450	234	1.03	221.99	2.22	22.20	194.70	93%
8	177.00	445	366	1.15	90.44	0.90	9.04	186.04	89%
9	183.00	438	261	0.96	169.91	1.70	16.99	199.99	96%
10	183.00	439	230	1.11	231.79	2.32	23.18	206.18	99%
11	183.00	449	268	1.11	200.81	2.01	20.08	203.08	97%
12	183.00	438	297	1.10	155.27	1.55	15.53	198.53	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.46	0.50	5.05	188.05	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.16	0.38	3.82	191.82	92%
16	188.00	442	368	1.09	80.71	0.81	8.07	196.07	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	325	1.10	124.96	1.25	12.50	210.50	101%
20	203.00	438	421	1.06	18.30	0.18	1.83	204.83	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	358.11	3.58	35.81	197.31	94%
2	161.50	465	285	1.92	345.86	3.46	34.59	196.09	94%
3	161.50	485	352	2.11	281.18	2.81	28.12	189.62	91%
4	166.50	475	324	2.16	325.43	3.25	32.54	199.04	95%
5	166.50	480	318	2.21	358.19	3.58	35.82	202.32	97%
6	166.50	470	431	2.24	87.09	0.87	8.71	175.21	84%
7	169.00	442	291	1.12	169.21	1.69	16.92	185.92	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.29	2.65	26.53	200.03	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.28	2.19	21.93	199.93	96%
10	178.00	440	207	1.00	233.21	2.33	23.32	201.32	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.06	2.19	21.91	199.91	96%
12	178.00	446	422	1.10	26.92	0.27	2.69	180.69	86%
13	178.00	432	412	1.08	21.39	0.21	2.14	180.14	86%
14	188.00	452	308	1.06	152.19	1.52	15.22	203.22	97%
15	188.00	442	306	1.10	149.86	1.50	14.99	202.99	97%
16	188.00	421	398	1.08	25.20	0.25	2.52	190.52	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **24-Jun-00**  
Cota de emba 209.234 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

17:00

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	258	1.31	215.32	2.15	21.53	191.03	91%
2	169.50	416	172	1.20	292.41	2.92	29.24	198.74	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	218	1.23	242.44	2.42	24.24	198.74	95%
5	174.50	427	225	1.22	245.98	2.46	24.60	199.10	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.90	1.36	13.59	188.09	90%
7	175.50	441	325	1.10	127.73	1.28	12.77	188.27	90%
8	179.50	445	262	1.22	222.88	2.23	22.29	201.79	96%
9	186.00	450	290	1.11	177.26	1.77	17.73	203.73	97%
10	186.00	432	285	1.21	178.22	1.78	17.82	203.82	97%
11	186.00	468	355	1.22	138.25	1.38	13.82	199.82	96%
12	186.00	450	340	1.15	126.55	1.27	12.66	198.66	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.96	0.56	5.60	191.60	92%
14	191.00	449	297	0.95	144.36	1.44	14.44	205.44	98%
15	191.00	441	297	0.99	142.17	1.42	14.22	205.22	98%
16	191.00	470	408	1.09	67.48	0.67	6.75	197.75	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	420	1.13	29.94	0.30	2.99	203.99	97%
19	201.00	420	407	1.00	13.08	0.13	1.31	202.31	97%
20	206.00	437	396	1.13	46.02	0.46	4.60	210.60	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	311	1.07	147.45	1.47	14.74	181.24	87%
2	166.50	466	122	0.93	320.06	3.20	32.01	198.51	95%
3	166.50	448	149	0.91	272.03	2.72	27.20	193.70	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.19	2.06	20.62	191.62	92%
5	171.00	458	192	1.03	273.82	2.74	27.38	198.38	95%
6	171.00	431	186	1.13	277.16	2.77	27.72	198.72	95%
7	172.50	450	235	1.03	221.87	2.22	22.19	194.69	93%
8	177.00	445	367	1.15	90.27	0.90	9.03	186.03	89%
9	183.00	438	261	0.96	169.67	1.70	16.97	199.97	96%
10	183.00	439	230	1.11	231.48	2.31	23.15	206.15	99%
11	183.00	449	267	1.11	202.07	2.02	20.21	203.21	97%
12	183.00	438	297	1.10	155.11	1.55	15.51	198.51	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.24	0.50	5.02	188.02	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.15	0.38	3.82	191.82	92%
16	188.00	442	369	1.09	80.00	0.80	8.00	196.00	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	326	1.10	124.66	1.25	12.47	210.47	101%
20	203.00	438	420	1.06	19.45	0.19	1.94	204.94	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	357.99	3.58	35.80	197.30	94%
2	161.50	465	229	1.92	452.38	4.52	45.24	206.74	99%
3	161.50	485	352	2.11	281.33	2.81	28.13	189.63	91%
4	166.50	475	325	2.16	324.75	3.25	32.48	198.98	95%
5	166.50	480	334	2.21	323.17	3.23	32.32	198.82	95%
6	166.50	470	431	2.24	86.29	0.86	8.63	175.13	84%
7	169.00	442	291	1.12	168.91	1.69	16.89	185.89	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.15	2.65	26.51	200.01	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.22	2.19	21.92	199.92	96%
10	178.00	440	208	1.00	232.13	2.32	23.21	201.21	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.06	2.19	21.91	199.91	96%
12	178.00	446	422	1.10	26.78	0.27	2.68	180.68	86%
13	178.00	432	414	1.08	19.44	0.19	1.94	179.94	86%
14	188.00	452	309	1.06	152.02	1.52	15.20	203.20	97%
15	188.00	442	305	1.10	150.29	1.50	15.03	203.03	97%
16	188.00	421	399	1.08	23.92	0.24	2.39	190.39	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					



Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **25-Jun-00**  
 Cota de emba 209.214 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

08:30

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	259	1.31	214.08	2.14	21.41	190.91	91%
2	169.50	416	172	1.20	292.42	2.92	29.24	198.74	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	218	1.23	242.22	2.42	24.22	198.72	95%
5	174.50	427	225	1.22	246.24	2.46	24.62	199.12	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.57	1.36	13.56	188.06	90%
7	175.50	441	324	1.10	128.17	1.28	12.82	188.32	90%
8	179.50	445	263	1.22	222.33	2.22	22.23	201.73	96%
9	186.00	450	290	1.11	177.53	1.78	17.75	203.75	97%
10	186.00	432	285	1.21	177.65	1.78	17.76	203.76	97%
11	186.00	468	354	1.22	138.55	1.39	13.86	199.86	96%
12	186.00	450	340	1.15	126.90	1.27	12.69	198.69	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.93	0.56	5.59	191.59	92%
14	191.00	449	297	0.95	144.60	1.45	14.46	205.46	98%
15	191.00	441	337	0.99	103.10	1.03	10.31	201.31	96%
16	191.00	470	408	1.09	67.82	0.68	6.78	197.78	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	420	1.13	29.71	0.30	2.97	203.97	97%
19	201.00	420	407	1.00	13.50	0.13	1.35	202.35	97%
20	206.00	437	396	1.13	46.04	0.46	4.60	210.60	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	312	1.07	147.12	1.47	14.71	181.21	87%
2	166.50	466	122	0.93	320.08	3.20	32.01	198.51	95%
3	166.50	448	148	0.91	272.92	2.73	27.29	193.79	93%
4	171.00	460	271	1.09	206.19	2.06	20.62	191.62	92%
5	171.00	458	193	1.03	273.09	2.73	27.31	198.31	95%
6	171.00	431	186	1.13	277.36	2.77	27.74	198.74	95%
7	172.50	450	234	1.03	221.98	2.22	22.20	194.70	93%
8	177.00	445	367	1.15	89.86	0.90	8.99	185.99	89%
9	183.00	438	261	0.96	169.63	1.70	16.96	199.96	96%
10	183.00	439	230	1.11	232.08	2.32	23.21	206.21	99%
11	183.00	449	269	1.11	200.08	2.00	20.01	203.01	97%
12	183.00	438	297	1.10	155.40	1.55	15.54	198.54	95%
13	183.00	438	388	0.99	49.66	0.50	4.97	187.97	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.23	0.38	3.82	191.82	92%
16	188.00	442	368	1.09	80.54	0.81	8.05	196.05	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	325	1.10	125.32	1.25	12.53	210.53	101%
20	203.00	438	420	1.06	19.37	0.19	1.94	204.94	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	301	2.08	360.58	3.61	36.06	197.56	94%
2	161.50	465	285	1.92	346.36	3.46	34.64	196.14	94%
3	161.50	485	352	2.11	280.24	2.80	28.02	189.52	91%
4	166.50	475	324	2.16	325.35	3.25	32.53	199.03	95%
5	166.50	480	334	2.21	323.17	3.23	32.32	198.82	95%
6	166.50	470	431	2.24	86.93	0.87	8.69	175.19	84%
7	169.00	442	291	1.12	168.62	1.69	16.86	185.86	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.38	2.65	26.54	200.04	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.33	2.19	21.93	199.93	96%
10	178.00	440	208	1.00	232.13	2.32	23.21	201.21	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.10	2.19	21.91	199.91	96%
12	178.00	446	422	1.10	26.78	0.27	2.68	180.68	86%
13	178.00	432	412	1.08	21.82	0.22	2.18	180.18	86%
14	188.00	452	309	1.06	152.05	1.52	15.21	203.21	97%
15	188.00	442	305	1.10	150.65	1.51	15.06	203.06	97%
16	188.00	421	398	1.08	24.96	0.25	2.50	190.50	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: 26-Jun-00

17:00

Cota de emba 209.196 ms.n.m  
Aguas abajo ms.n.m

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibracion	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	258	1.31	214.85	2.15	21.48	190.98	91%
2	169.50	416	173	1.20	291.88	2.92	29.19	198.69	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	219	1.23	241.66	2.42	24.17	198.67	95%
5	174.50	427	225	1.22	246.24	2.46	24.62	199.12	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.21	1.35	13.52	188.02	90%
7	175.50	441	325	1.10	127.94	1.28	12.79	188.29	90%
8	179.50	445	262	1.22	222.87	2.23	22.29	201.79	96%
9	186.00	450	290	1.11	177.53	1.78	17.75	203.75	97%
10	186.00	432	285	1.21	177.58	1.78	17.76	203.76	97%
11	186.00	468	354	1.22	138.55	1.39	13.86	199.86	96%
12	186.00	450	340	1.15	126.90	1.27	12.69	198.69	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.93	0.56	5.59	191.59	92%
14	191.00	449	297	0.95	144.60	1.45	14.46	205.46	98%
15	191.00	441	337	0.99	103.10	1.03	10.31	201.31	96%
16	191.00	470	406	1.09	69.42	0.69	6.94	197.94	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	420	1.13	29.71	0.30	2.97	203.97	98%
19	201.00	420	407	1.00	13.46	0.13	1.35	202.35	97%
20	206.00	437	396	1.13	45.93	0.46	4.59	210.59	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	312	1.07	146.42	1.46	14.64	181.14	87%
2	166.50	466	121	0.93	321.05	3.21	32.11	198.61	95%
3	166.50	448	149	0.91	271.68	2.72	27.17	193.67	93%
4	171.00	460	272	1.09	205.44	2.05	20.54	191.54	92%
5	171.00	458	193	1.03	273.09	2.73	27.31	196.31	95%
6	171.00	431	185	1.13	278.07	2.78	27.81	198.81	95%
7	172.50	450	235	1.03	221.91	2.22	22.19	194.69	93%
8	177.00	445	368	1.15	89.04	0.89	8.90	185.90	89%
9	183.00	438	262	0.96	169.24	1.69	16.92	199.92	96%
10	183.00	439	232	1.11	230.30	2.30	23.03	206.03	98%
11	183.00	449	267	1.11	201.63	2.02	20.16	203.16	97%
12	183.00	438	297	1.10	155.14	1.55	15.51	198.51	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.13	0.50	5.01	188.01	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.18	0.38	3.82	191.82	92%
16	188.00	442	369	1.09	79.54	0.80	7.95	195.95	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	325	1.10	125.03	1.25	12.50	210.50	101%
20	203.00	438	420	1.06	19.37	0.19	1.94	204.94	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	357.41	3.57	35.74	197.24	94%
2	161.50	465	285	1.92	344.72	3.45	34.47	195.97	94%
3	161.50	485	352	2.11	280.29	2.80	28.03	189.53	91%
4	166.50	475	325	2.16	324.47	3.24	32.45	198.95	95%
5	166.50	480	335	2.21	321.37	3.21	32.14	198.64	95%
6	166.50	470	432	2.24	85.61	0.86	8.56	175.06	84%
7	169.00	442	292	1.12	168.51	1.69	16.85	185.85	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.10	2.65	26.51	200.01	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.26	2.19	21.93	199.93	96%
10	178.00	440	208	1.00	231.64	2.32	23.16	201.16	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.03	2.19	21.90	199.90	96%
12	178.00	446	421	1.10	27.16	0.27	2.72	180.72	86%
13	178.00	432	412	1.08	21.49	0.21	2.15	180.15	86%
14	188.00	452	309	1.06	152.05	1.52	15.21	203.21	97%
15	188.00	442	305	1.10	150.19	1.50	15.02	203.02	97%
16	188.00	421	398	1.08	24.88	0.25	2.49	190.49	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

Cuadro de las Presiones Obtenidas de los Piezómetros Eléctricos Maihak  
 Instalados en la Presa Tinajones

Fecha: **27-Jun-00**  
 Cota de emba 209.159 ms.n.m  
 Aguas abajo ms.n.m

10:00

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	Lecturas Transducidas		Constante de Calibración	Presion de poros			Cota piezometr.	Porcentaje
		Inicial	Actual		Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)		
<b>0+350</b>									
1	169.50	422	258	1.31	214.82	2.15	21.48	190.98	91%
2	169.50	416	173	1.20	292.09	2.92	29.21	198.71	95%
3	169.50	438		1.17					
4	174.50	415	219	1.23	241.66	2.42	24.17	198.67	95%
5	174.50	427	226	1.22	245.52	2.46	24.55	199.05	95%
6	174.50	466	350	1.17	135.23	1.35	13.52	188.02	90%
7	175.50	441	325	1.10	127.95	1.28	12.79	188.29	90%
8	179.50	445	263	1.22	222.04	2.22	22.20	201.70	96%
9	186.00	450	290	1.11	177.38	1.77	17.74	203.74	97%
10	186.00	432	285	1.21	177.44	1.77	17.74	203.74	97%
11	186.00	468	355	1.22	137.74	1.38	13.77	199.77	96%
12	186.00	450	339	1.15	127.14	1.27	12.71	198.71	95%
13	186.00	430	375	1.01	55.93	0.56	5.59	191.59	92%
14	191.00	449	297	0.95	143.93	1.44	14.39	205.39	98%
15	191.00	441	336	0.99	104.24	1.04	10.42	201.42	96%
16	191.00	470	408	1.09	67.64	0.68	6.76	197.76	95%
17	201.00	449		1.15					
18	201.00	446	420	1.13	29.72	0.30	2.97	203.97	98%
19	201.00	420	406	1.00	13.76	0.14	1.38	202.38	97%
20	206.00	437	396	1.13	46.00	0.46	4.60	210.60	101%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	166.50	449	311	1.07	147.26	1.47	14.73	181.23	87%
2	166.50	466	122	0.93	319.51	3.20	31.95	198.45	95%
3	166.50	448	149	0.91	271.69	2.72	27.17	193.67	93%
4	171.00	460	271	1.09	205.59	2.06	20.56	191.56	92%
5	171.00	458	193	1.03	272.48	2.72	27.25	198.25	95%
6	171.00	431	185	1.13	278.29	2.78	27.83	198.83	95%
7	172.50	450	235	1.03	221.91	2.22	22.19	194.69	93%
8	177.00	445	367	1.15	89.30	0.89	8.93	185.93	89%
9	183.00	438	262	0.96	169.14	1.69	16.91	199.91	96%
10	183.00	439	231	1.11	231.06	2.31	23.11	206.11	99%
11	183.00	449	269	1.11	199.97	2.00	20.00	203.00	97%
12	183.00	438	297	1.10	154.97	1.55	15.50	198.50	95%
13	183.00	438	387	0.99	50.59	0.51	5.06	188.06	90%
14	188.00	432		1.10					
15	188.00	444	405	0.99	38.12	0.38	3.81	191.81	92%
16	188.00	442	369	1.09	80.05	0.80	8.01	196.01	94%
17	198.00	447		1.11					
18	198.00	468		1.11					
19	198.00	439	325	1.10	125.20	1.25	12.52	210.52	101%
20	203.00	438	420	1.06	19.40	0.19	1.94	204.94	98%

Piezómetro	Elevación Estir m.s.n.m.	A	B	K	Kpa	Kg/cm2	m-H2O(20°)	Cota piezometr.	Porcentaje
1	161.50	474	302	2.08	357.44	3.57	35.74	197.24	94%
2	161.50	465	285	1.92	345.05	3.45	34.50	196.00	94%
3	161.50	485	353	2.11	279.33	2.79	27.93	189.43	91%
4	166.50	475	325	2.16	324.37	3.24	32.44	198.94	95%
5	166.50	480	334	2.21	322.52	3.23	32.25	198.75	95%
6	166.50	470	432	2.24	85.49	0.85	8.55	175.05	84%
7	169.00	442	292	1.12	168.29	1.68	16.83	185.83	89%
8	173.50	463	220	1.09	265.02	2.65	26.50	200.00	96%
9	178.00	445	246	1.10	219.13	2.19	21.91	199.91	96%
10	178.00	440	208	1.00	231.67	2.32	23.17	201.17	96%
11	178.00	442	225	1.01	219.08	2.19	21.91	199.91	96%
12	178.00	446	421	1.10	27.45	0.27	2.75	180.75	86%
13	178.00	432	412	1.08	21.58	0.22	2.16	180.16	86%
14	188.00	452	309	1.06	151.59	1.52	15.16	203.16	97%
15	188.00	442	305	1.10	150.52	1.51	15.05	203.05	97%
16	188.00	421	398	1.08	25.18	0.25	2.52	190.52	91%
17	198.00	453		1.00					
18	198.00	441		1.14					
19	198.00	404		1.11					
20	203.00	446		1.01					

# **CONTROL DE ASENTAMIENTO**

**ANEXO B**  
**ANALISIS DE INFILTRACION**

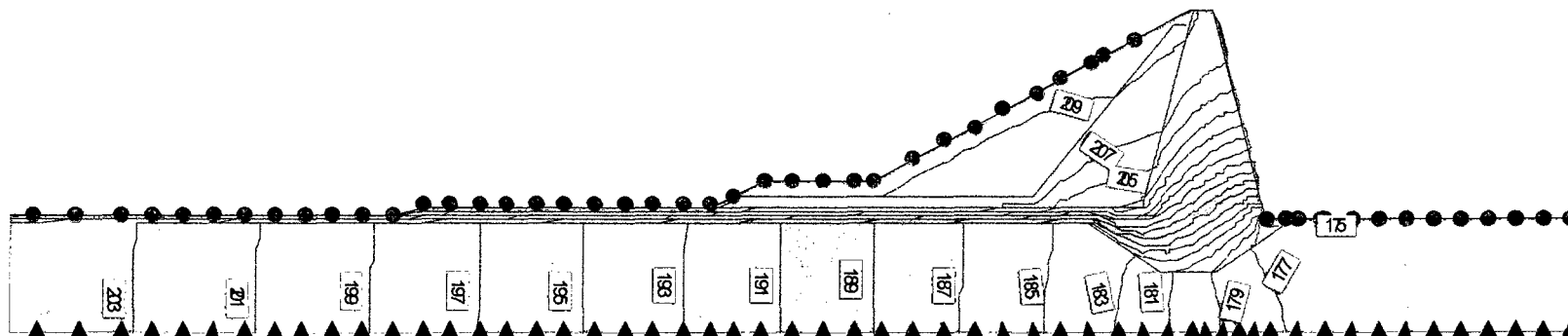
## **MALLA DE ELEMENTOS FINITOS**

**RESULTADOS**  
**ELF**

**RESULTADOS  
SEEP/W**

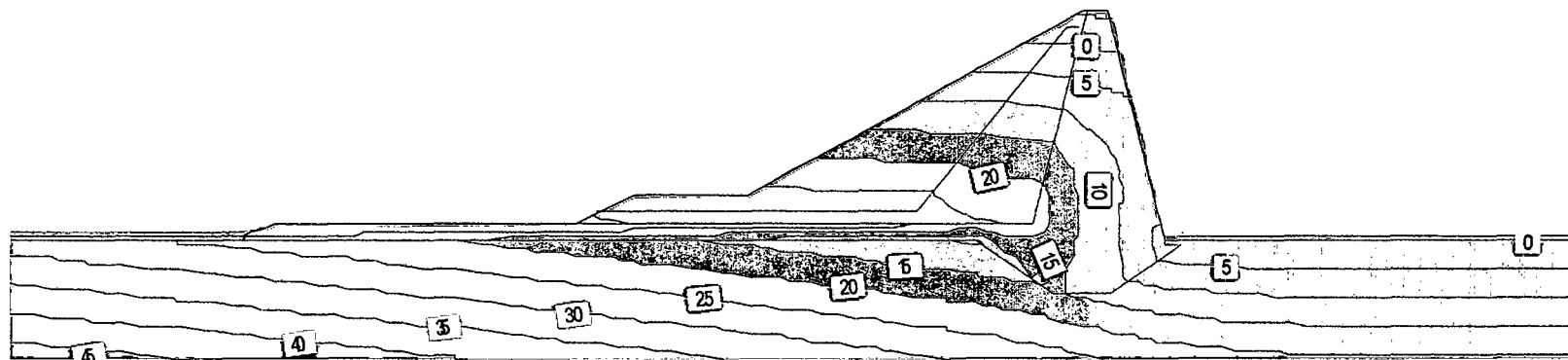


ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1 +850)  
NIVEL DE EMBALSE 209 M.S.N.M.  
SEEP/W



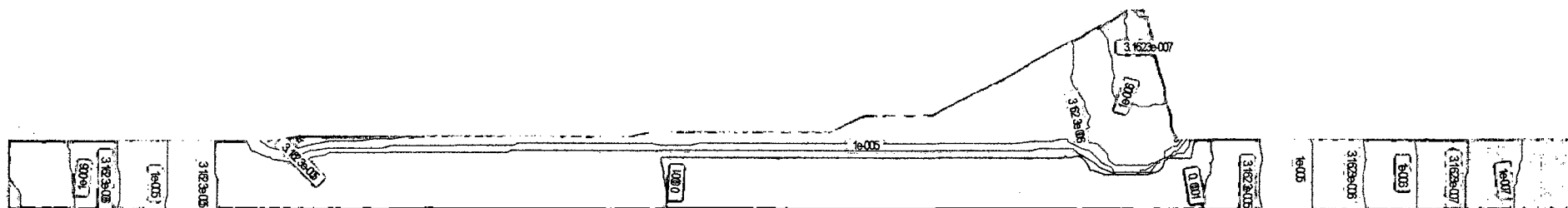
LAMINA 5.18-A: LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 209 M.S.N.M.  
SEEP/W



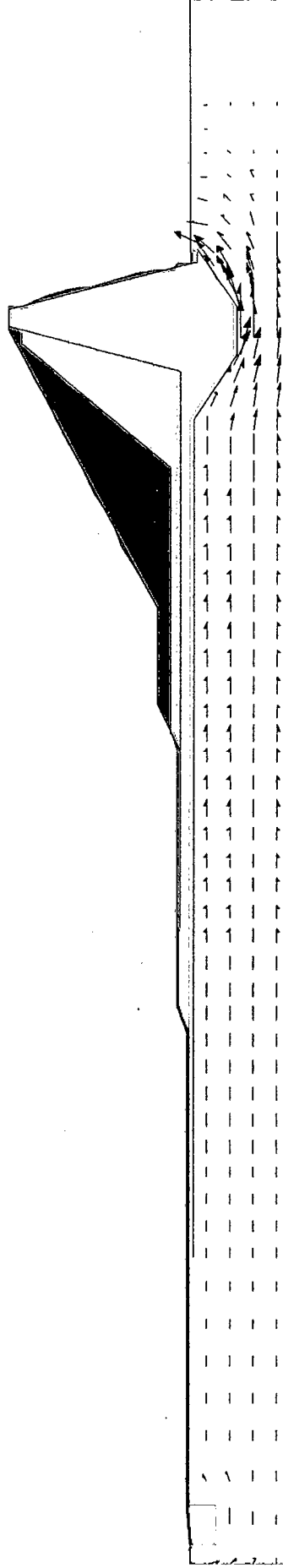
LAMINA 5.18-B: CONTORNO DE PRESIONES DE PORO

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 209 M.S.N.M.  
SEEP/W



LAMINA 5.18-C: CONTORNO DE GRADIENTE DE VELOCIDADES EN XY

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1 +850)  
NIVEL DE EMBALSE 209 M.S.N.M.  
SEEP/W



LAMINA 5-18-D: VECTORES VELOCIDAD

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 209 M.S.N.M.  
SEEP/W

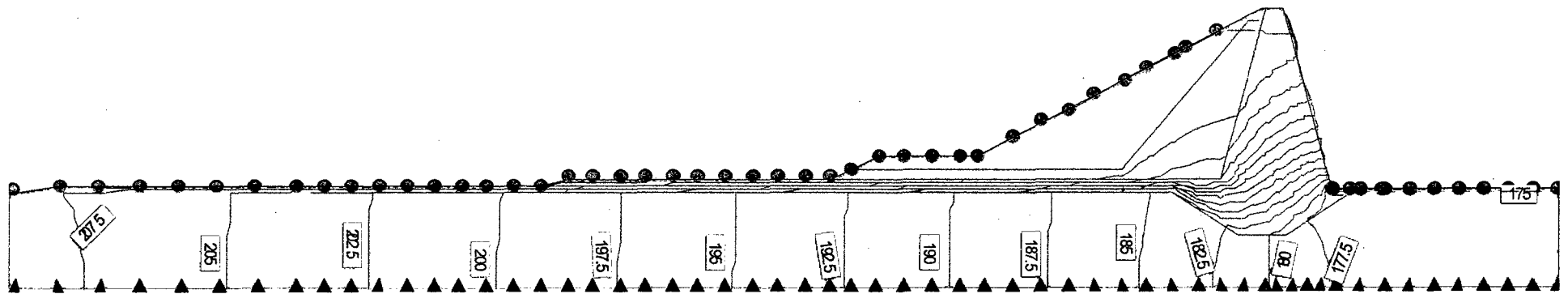


FIGURA 5-19-A: LÍNEAS EQUIPOTENCIALES( CARGA DE PRESIÓN TOTAL)

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 210 M.S.N.M.  
SEEP/W

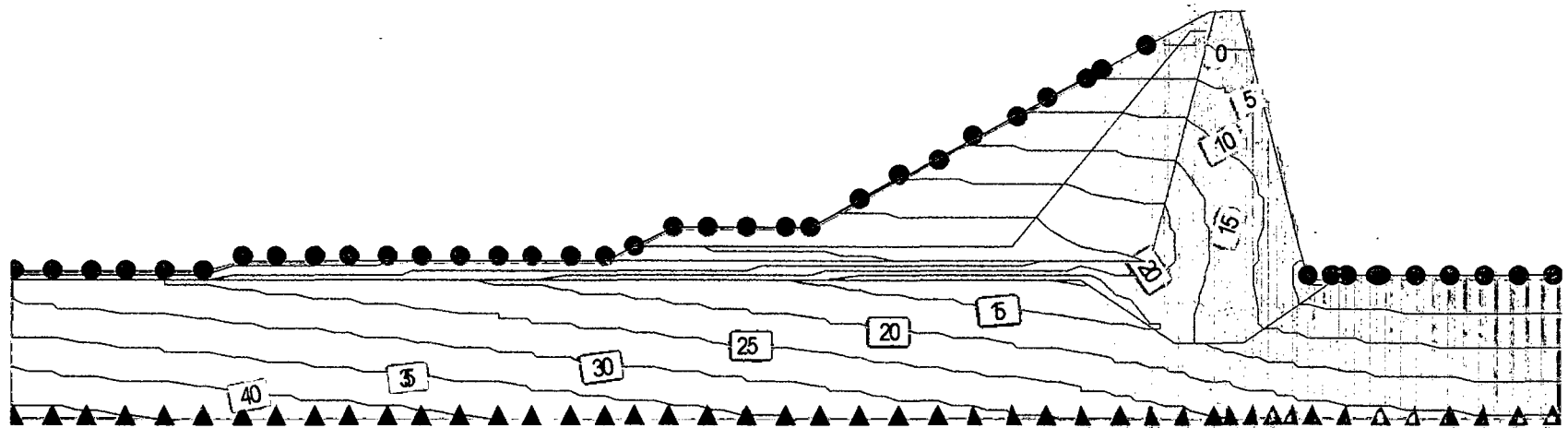


FIGURA 5-19-B: CONTORNO PRESIONES DE PORO

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 210 M.S.N.M.  
SEEP/W

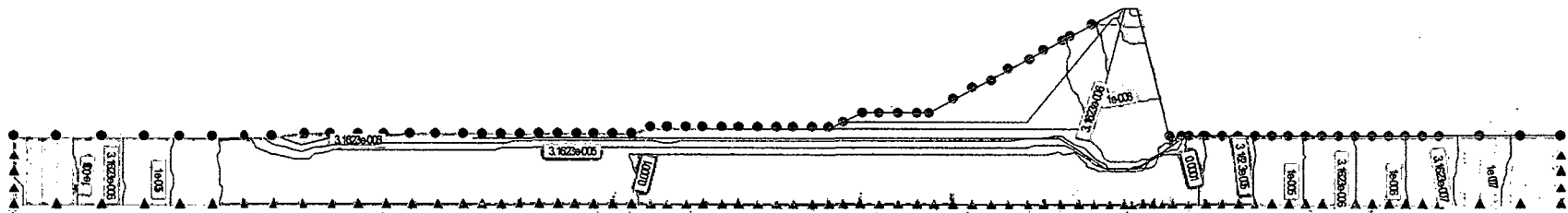


FIGURA 5-19-C: CONTORNO DE VELOCIDADES EN XY

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 213 M.S.N.M.  
SEEP/W

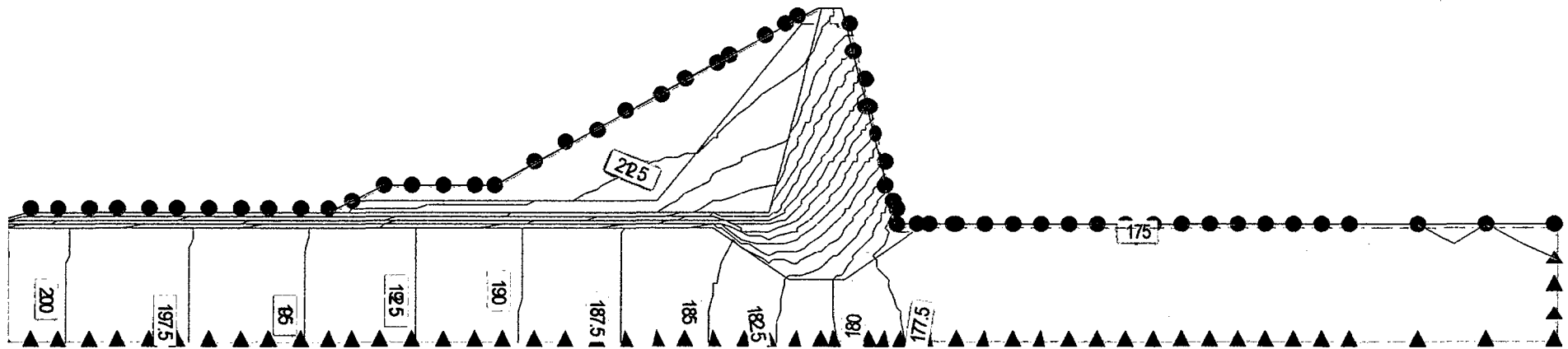


FIGURA 5-20A: LÍNEAS EQUIPOTENCIALES(CARGA DE PRESIÓN TOTAL)



ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 213 M.S.N.M.  
SEEP/W

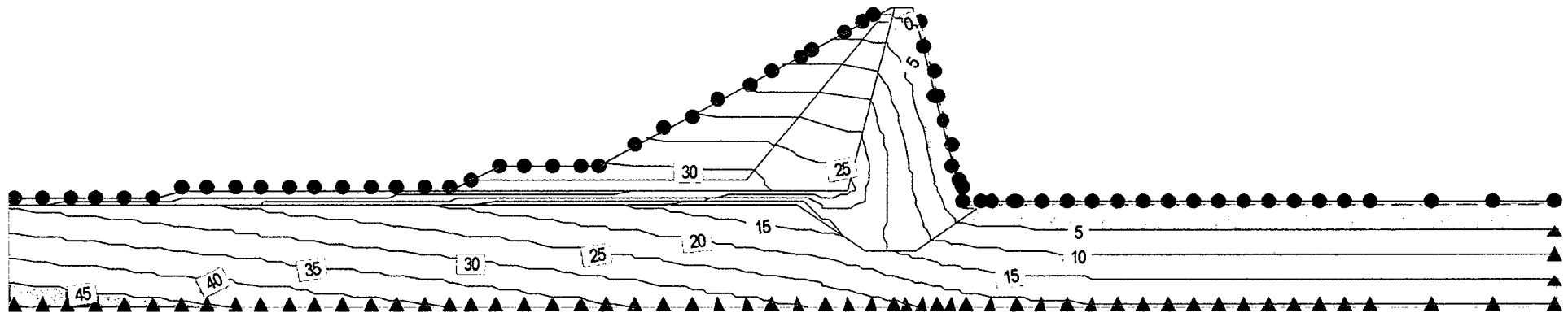
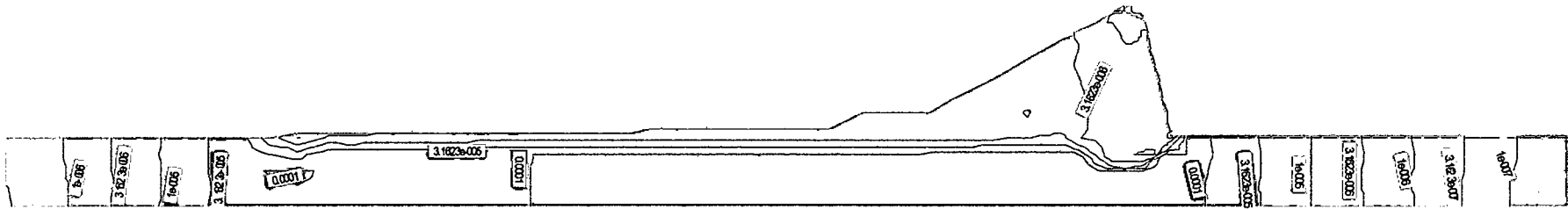
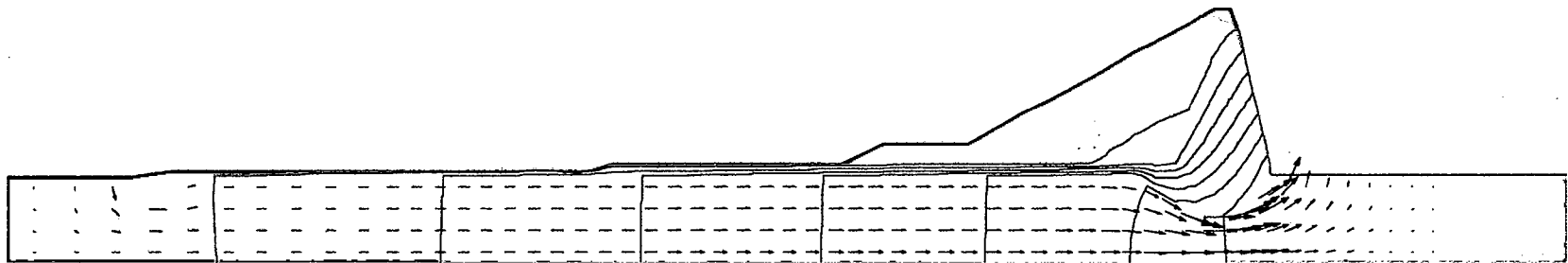


FIGURA 5-20-B: PRESIONES DE PORO

ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1 +850)  
NIVEL DE EMBALSE 213 M.S.N.M.  
SEEP/W



ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN ESTRUCTURAS DE TIERRA  
ANALISIS DE INFILTRACION PRESA PRINCIPAL TINAJONES( SECCION 1+850)  
NIVEL DE EMBALSE 213 M.S.N.M.  
SEEP/W



LAMINA 5-20-D: VECTORES VELOCIDAD

**ANEXO C**  
**ESTABILIDAD DE TALUDES**

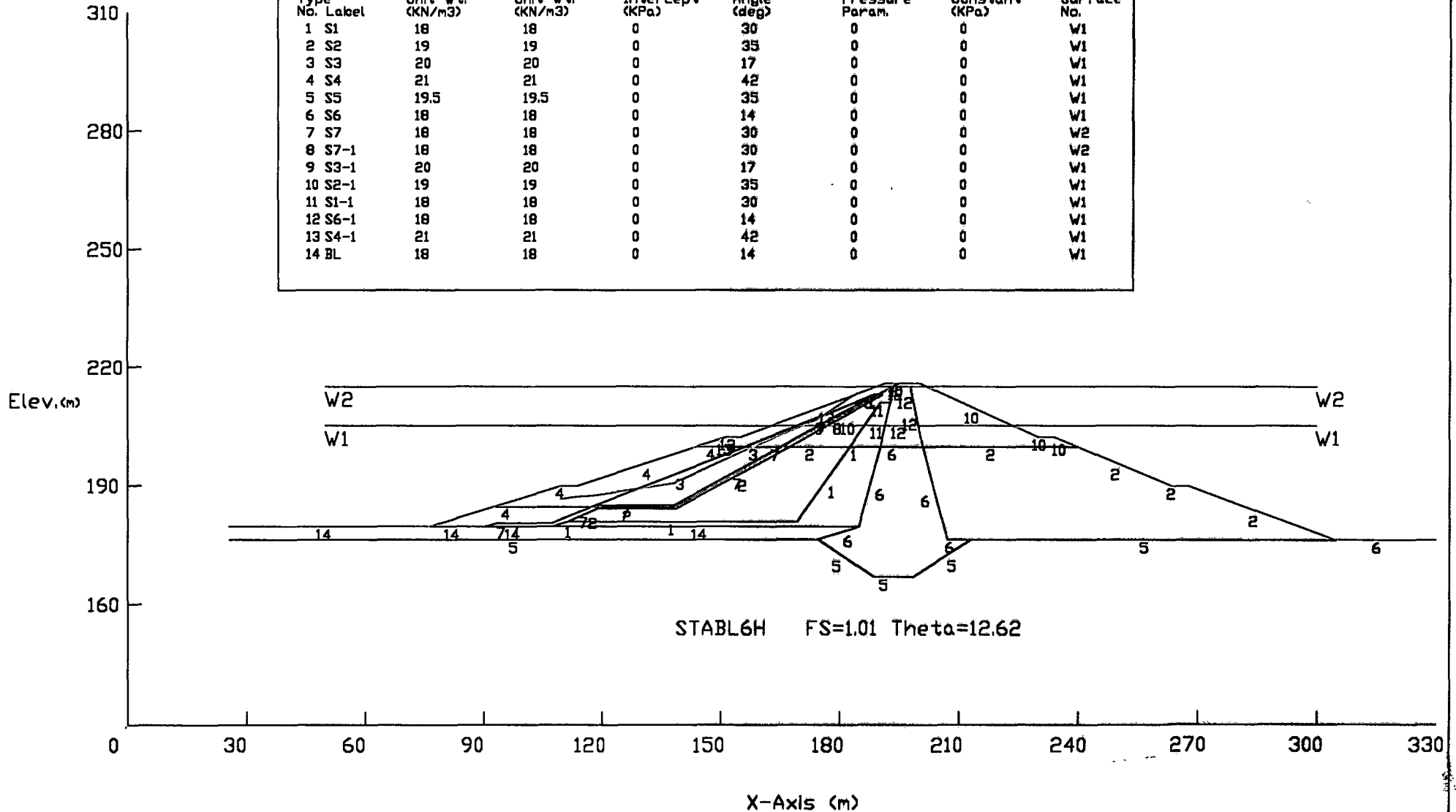
**RESULTADOS**  
**PCSTABL6H**

LAMINA:6-01

TINAJONES CASO 1-A FILTRO OCLUIDO W1=205 W2=215  
 ESTABILIDAD DE TALUDES (CORTO PLAZO) METODO DE SPENCER

C:\C1-B1.PLT

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	W1
2 S2	19	19	0	35	0	0	W1
3 S3	20	20	0	17	0	0	W1
4 S4	21	21	0	42	0	0	W1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 S6	18	18	0	14	0	0	W1
7 S7	18	18	0	30	0	0	W2
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	W2
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	W1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	W1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	W1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	W1
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	W1
14 BL	18	18	0	14	0	0	W1



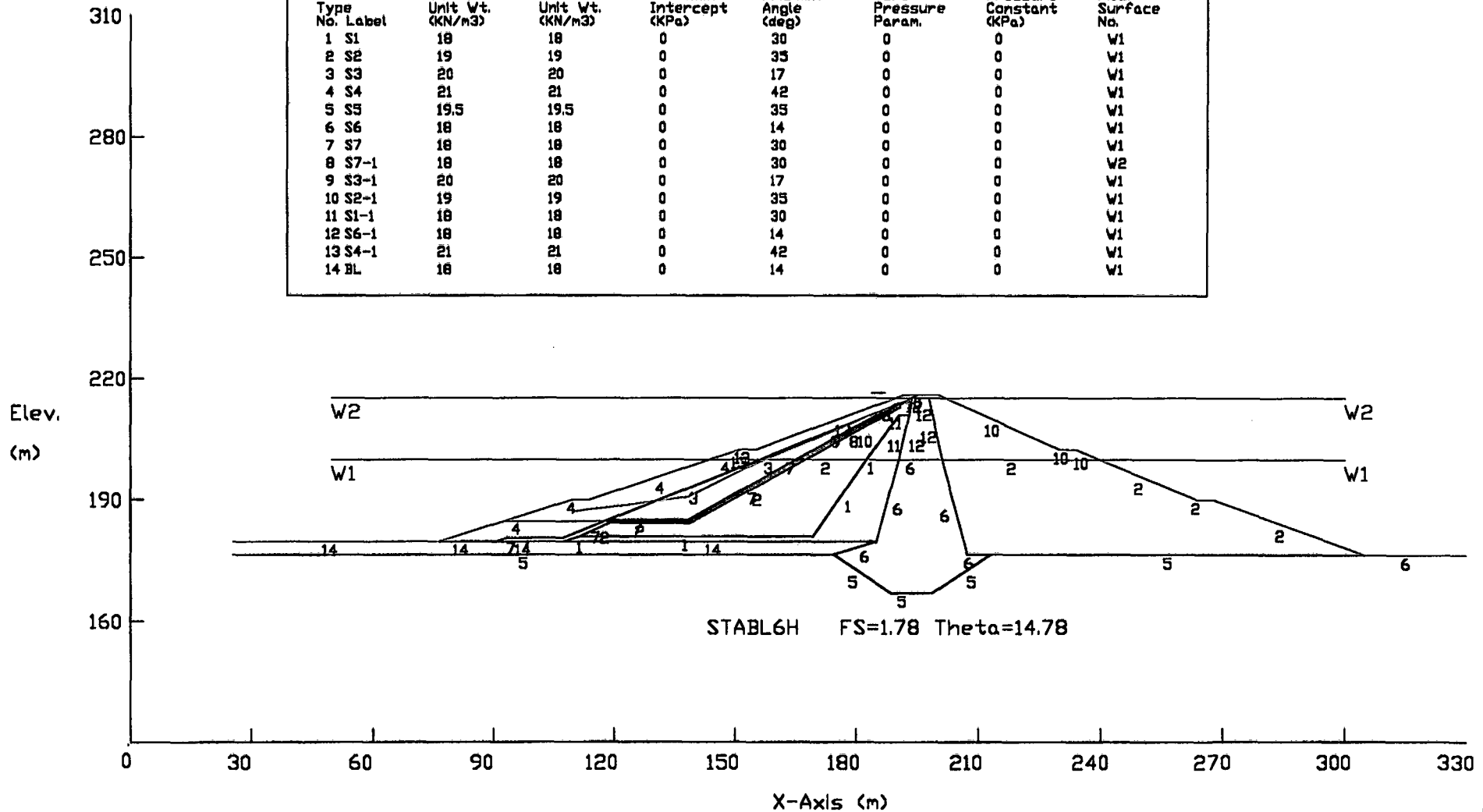
LAMINA:6-02

TINAJONES CASO 1-B FILTRO OCLUIDO W1=200 (s7) W2=215 (s7-1)

ESTABILIDAD DE TALUDES (CORTO PLAZO) METODO DE SPENCER

C:\C1-C.PLT

Soll Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	W1
2 S2	19	19	0	35	0	0	W1
3 S3	20	20	0	17	0	0	W1
4 S4	21	21	0	42	0	0	W1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 S6	18	18	0	14	0	0	W1
7 S7	18	18	0	30	0	0	W1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	W2
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	W1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	W1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	W1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	W1
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	W1
14 BL	18	18	0	14	0	0	W1



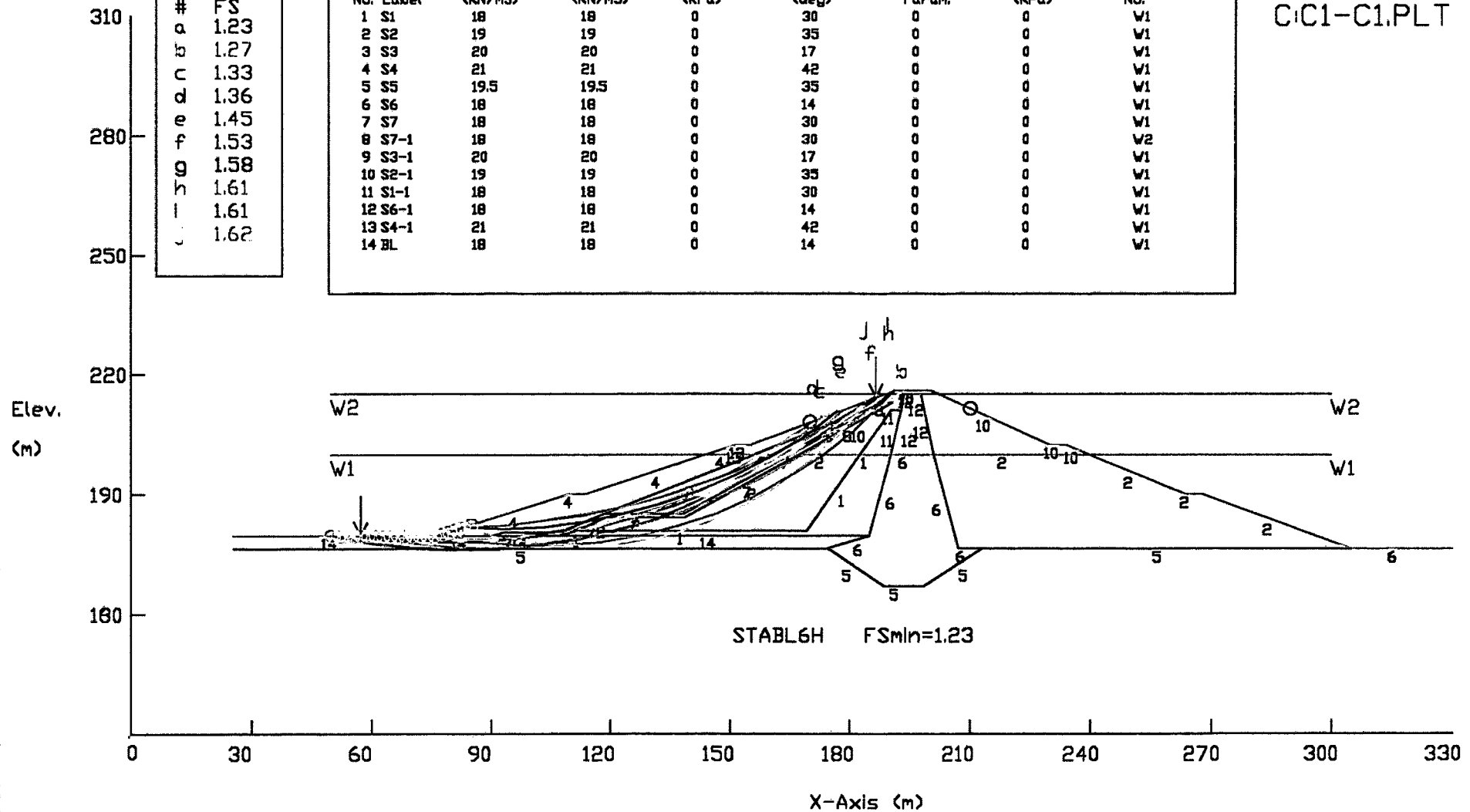
LAMINA:6-03

TINAJONES CASO 1-C FILTRO OCLUIDO W1=200 (s7) W2=215 (s7-1)  
 ESTABILIDAD DE TALUDES (CORTO PLAZO) METODO DE BISHOP MODIFICADO

C:\C1-C1.PLT

#	FS
a	1.23
b	1.27
c	1.33
d	1.36
e	1.45
f	1.53
g	1.58
h	1.61
i	1.61
j	1.62

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Saturated Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	V1
2 S2	19	19	0	35	0	0	V1
3 S3	20	20	0	17	0	0	V1
4 S4	21	21	0	42	0	0	V1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 S6	18	18	0	14	0	0	V1
7 S7	18	18	0	30	0	0	V1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	V2
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	V1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	V1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	V1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	V1
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	V1
14 BL	18	18	0	14	0	0	V1



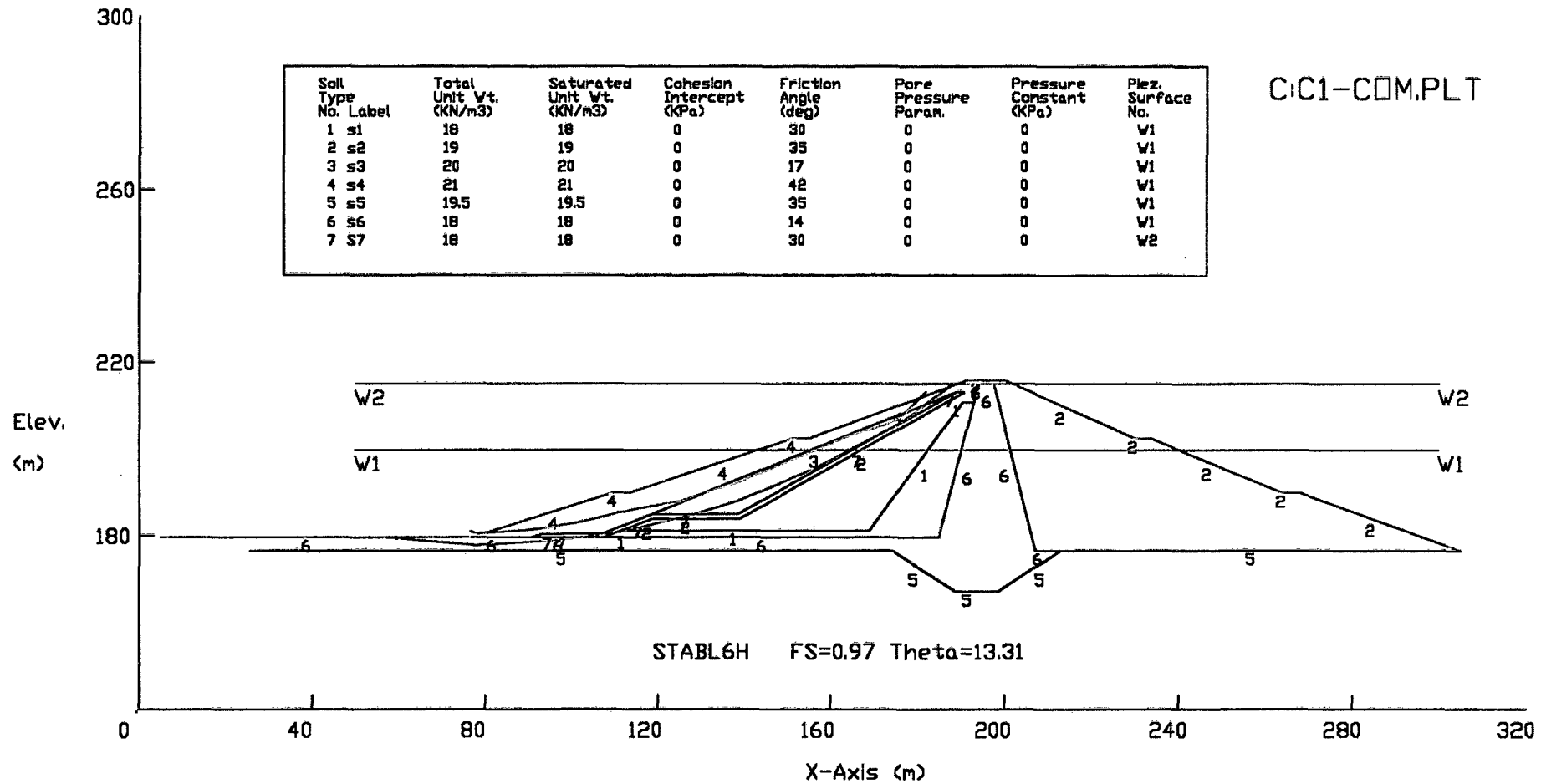


LAMINA:6-04

PRESA TINAJONES-CASO 1-D FILTRO OCLUIDO W1=200 W2=215  
 ESTABILIDAD DE TALUDES (CORTO PLAZO) METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	W1
2 s2	19	19	0	35	0	0	W1
3 s3	20	20	0	17	0	0	W1
4 s4	21	21	0	42	0	0	W1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 s6	18	18	0	14	0	0	W1
7 S7	18	18	0	30	0	0	W2

CIC1-COM.PLT



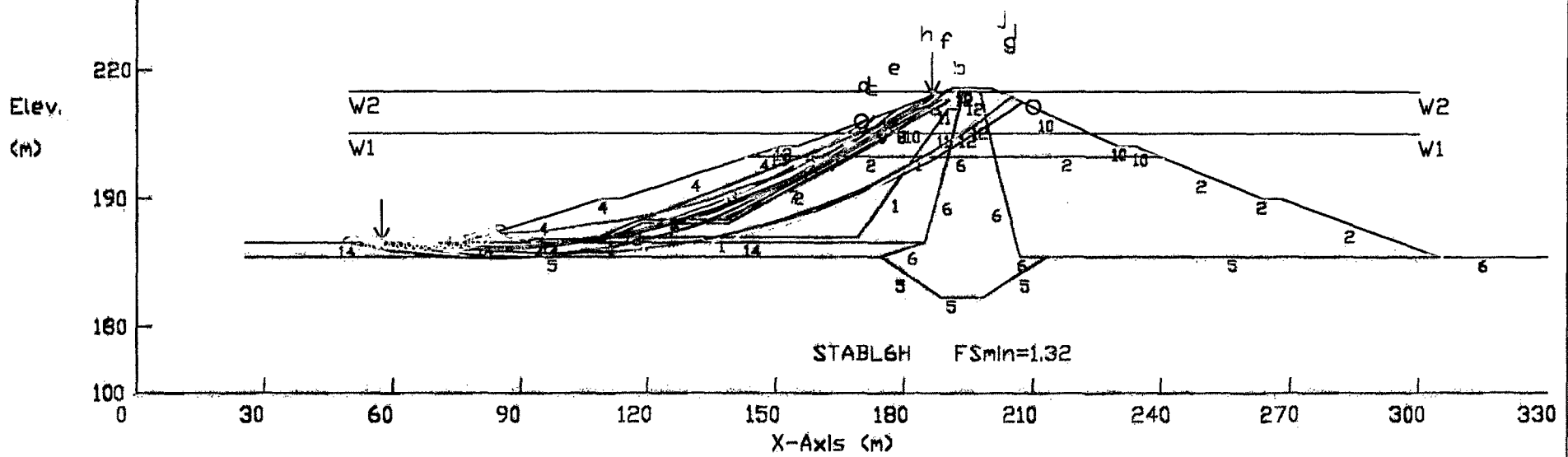
LAMINA:6-05

TINAJONES CASO 1-E FILTRO OCLUIDO W1=205 (s7) W2=215 (s7-1)  
 ESTABILIDAD DE TALUDES (CORTO PLAZO) METODO DE BISHOP MODIFICADO

CIC1-D.PLT

#	FS
a	1.32
b	1.34
c	1.43
d	1.45
e	1.57
f	1.65
g	1.65
h	1.66
i	1.67
j	1.67

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	W1
2 S2	19	19	0	35	0	0	W1
3 S3	20	20	0	17	0	0	W1
4 S4	21	21	0	42	0	0	W1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 S6	18	18	0	14	0	0	W1
7 S7	18	18	0	30	0	0	W1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	W2
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	W1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	W1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	W1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	W1
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	W1
14 BL	18	18	0	14	0	0	W1



LAMINA:6-06

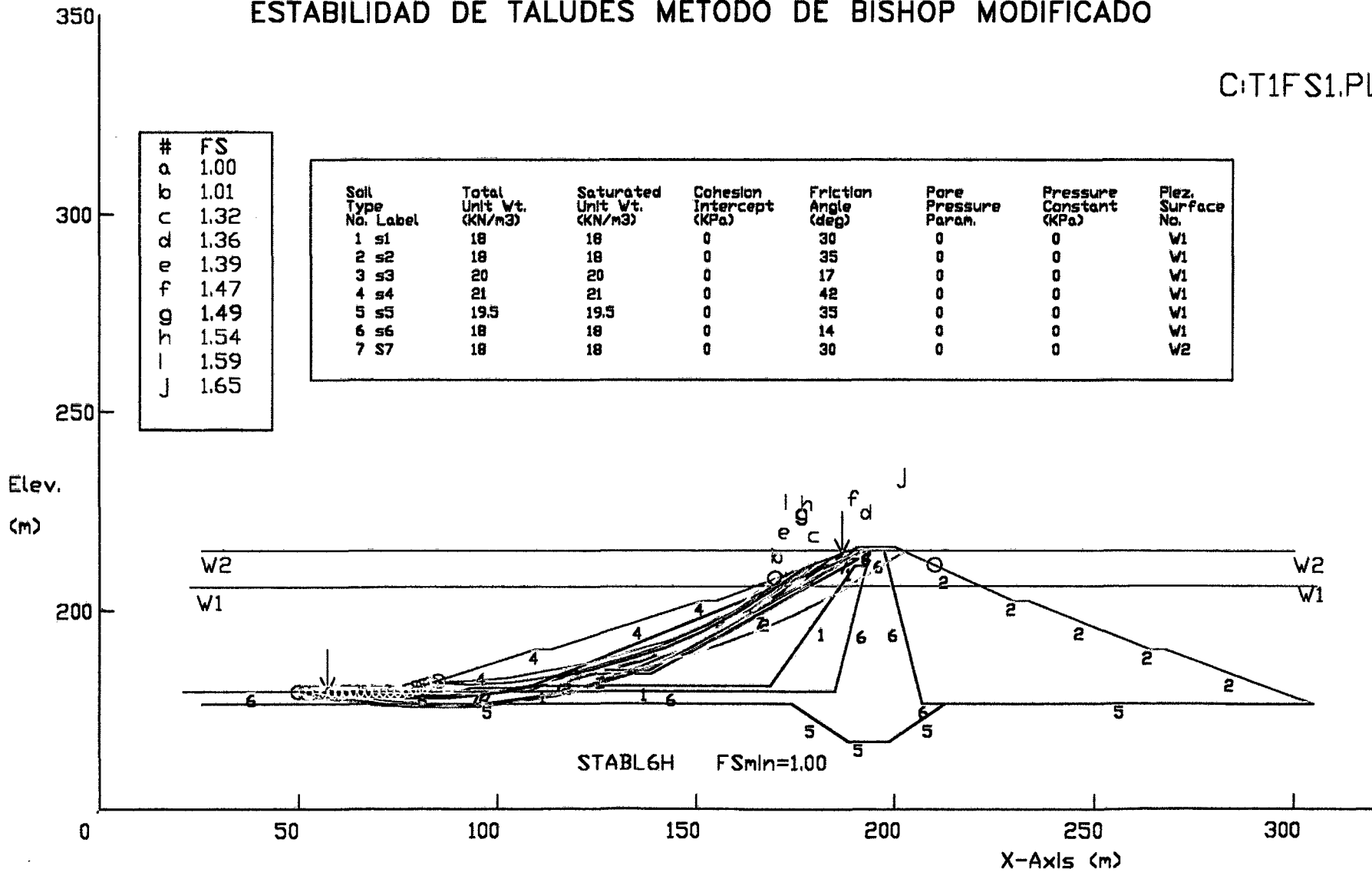
PRESA TINAJONES CASO 1-F (CORTO PLAZO) FILTRO OCLUIDO W1=206 W2=215

ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE BISHOP MODIFICADO

C:\T1FS1.PLT

#	FS
a	1.00
b	1.01
c	1.32
d	1.36
e	1.39
f	1.47
g	1.49
h	1.54
i	1.59
J	1.65

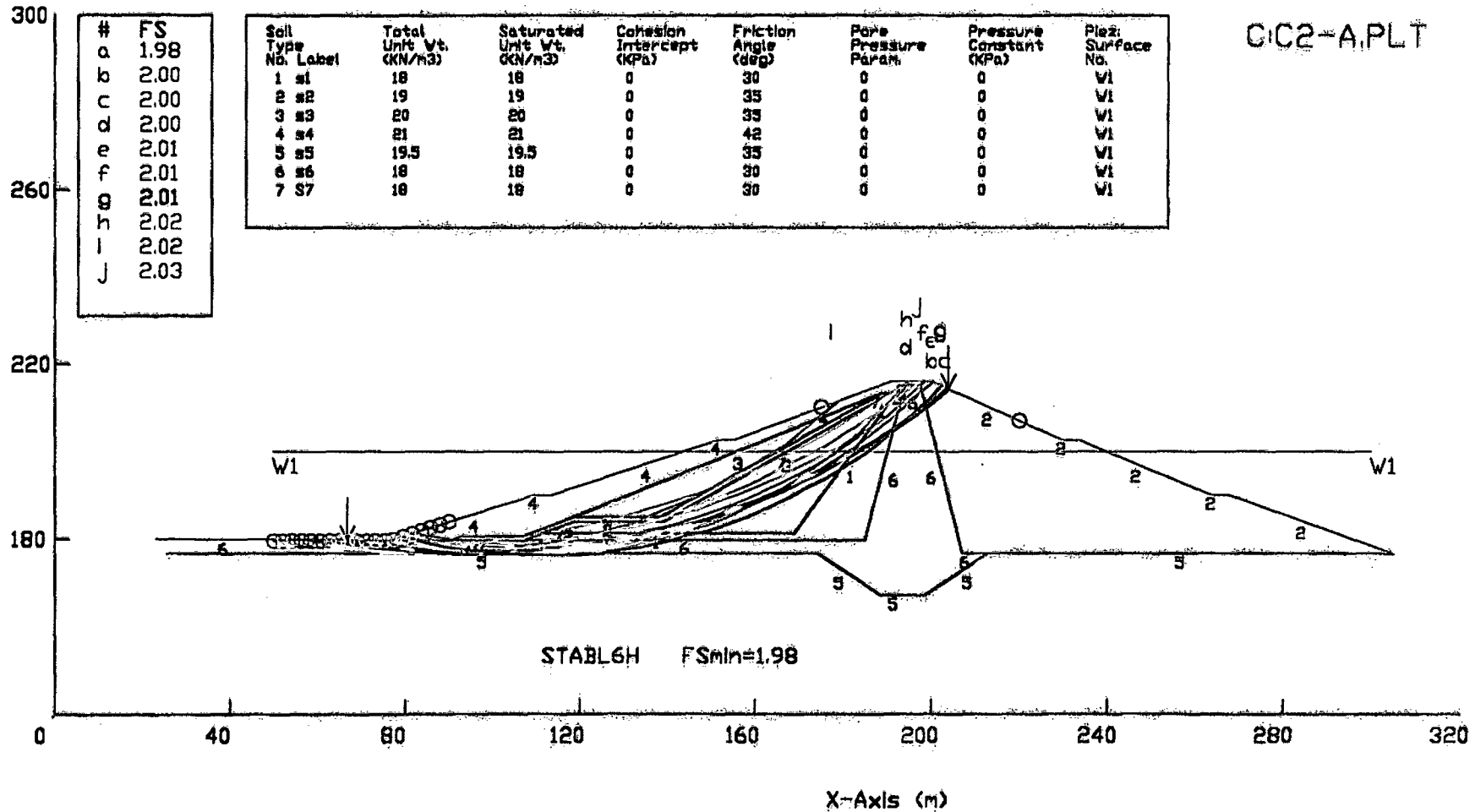
Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Saturated Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesion Intercept (kPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (kPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	W1
2 s2	18	18	0	35	0	0	W1
3 s3	20	20	0	17	0	0	W1
4 s4	21	21	0	42	0	0	W1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 s6	18	18	0	14	0	0	W1
7 s7	18	18	0	30	0	0	W2



LAMINA:6-07

PRESA TINAJONES CASO 2-A (LARGO PLAZO) EMBALSE 200  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE BISHOP MODIFICADO

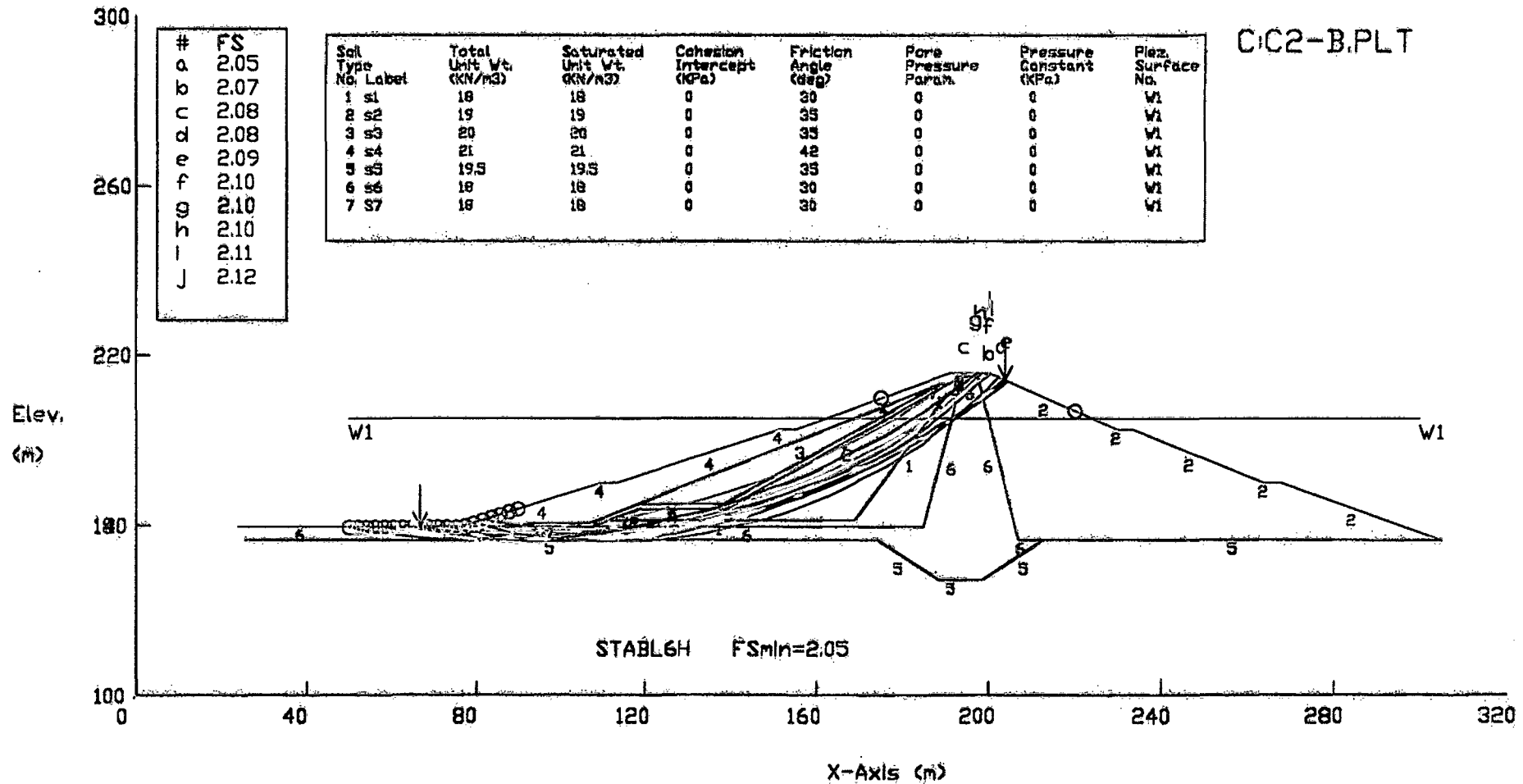
CIC2-A,PLT



LAMINA:6-08

PRESA TINAJONES CASO 2-B (LARGO PLAZO) EMBALSE 205  
ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE BISHOP MODIFICADO

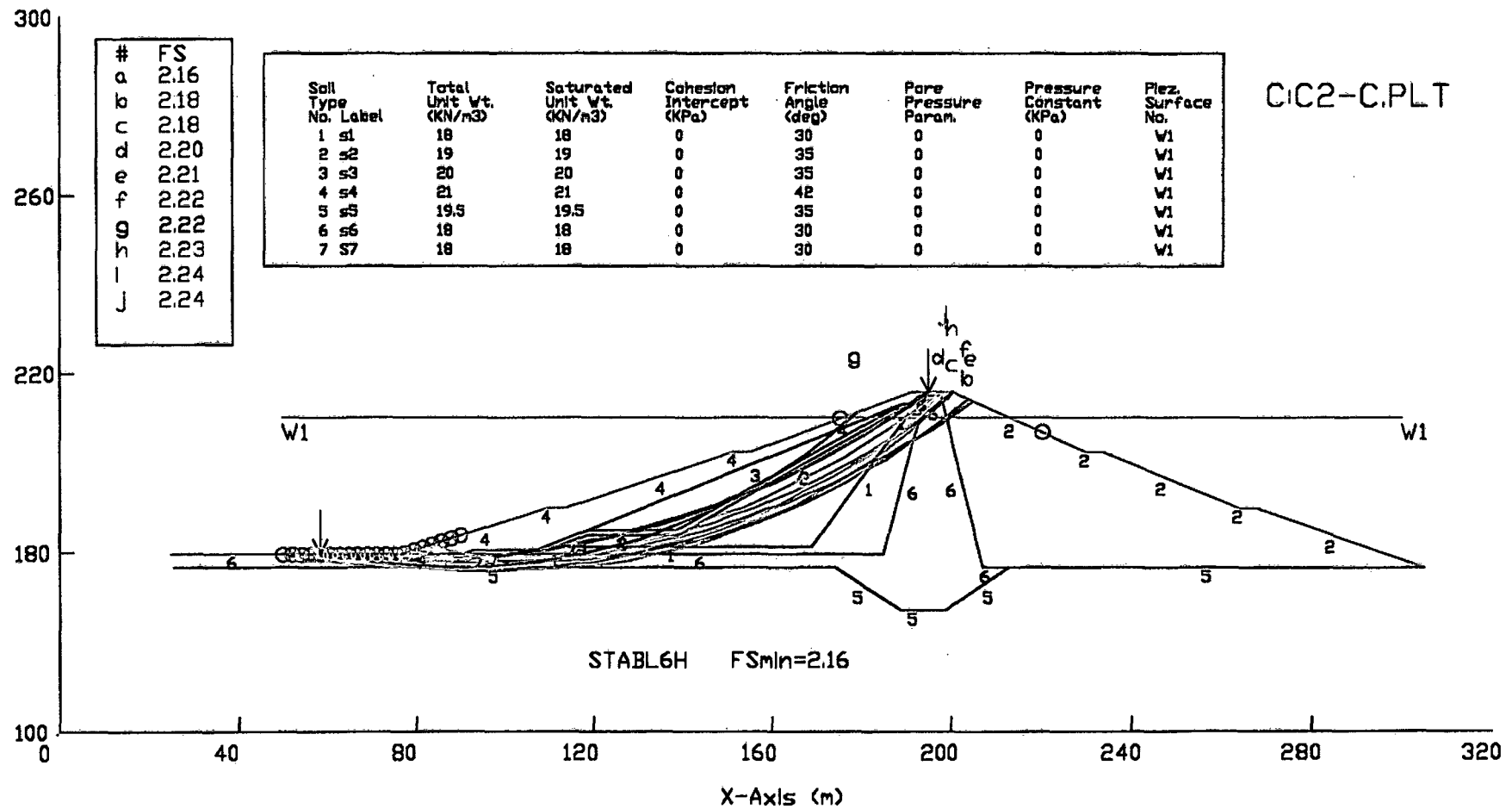
CIC2-B.PLT



LAMINA:6-09

PRESA TINAJONES CASO 2-C (LARGO PLAZO) EMBALSE 210  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE BISHOP MODIFICADO

CIC2-C.PLT

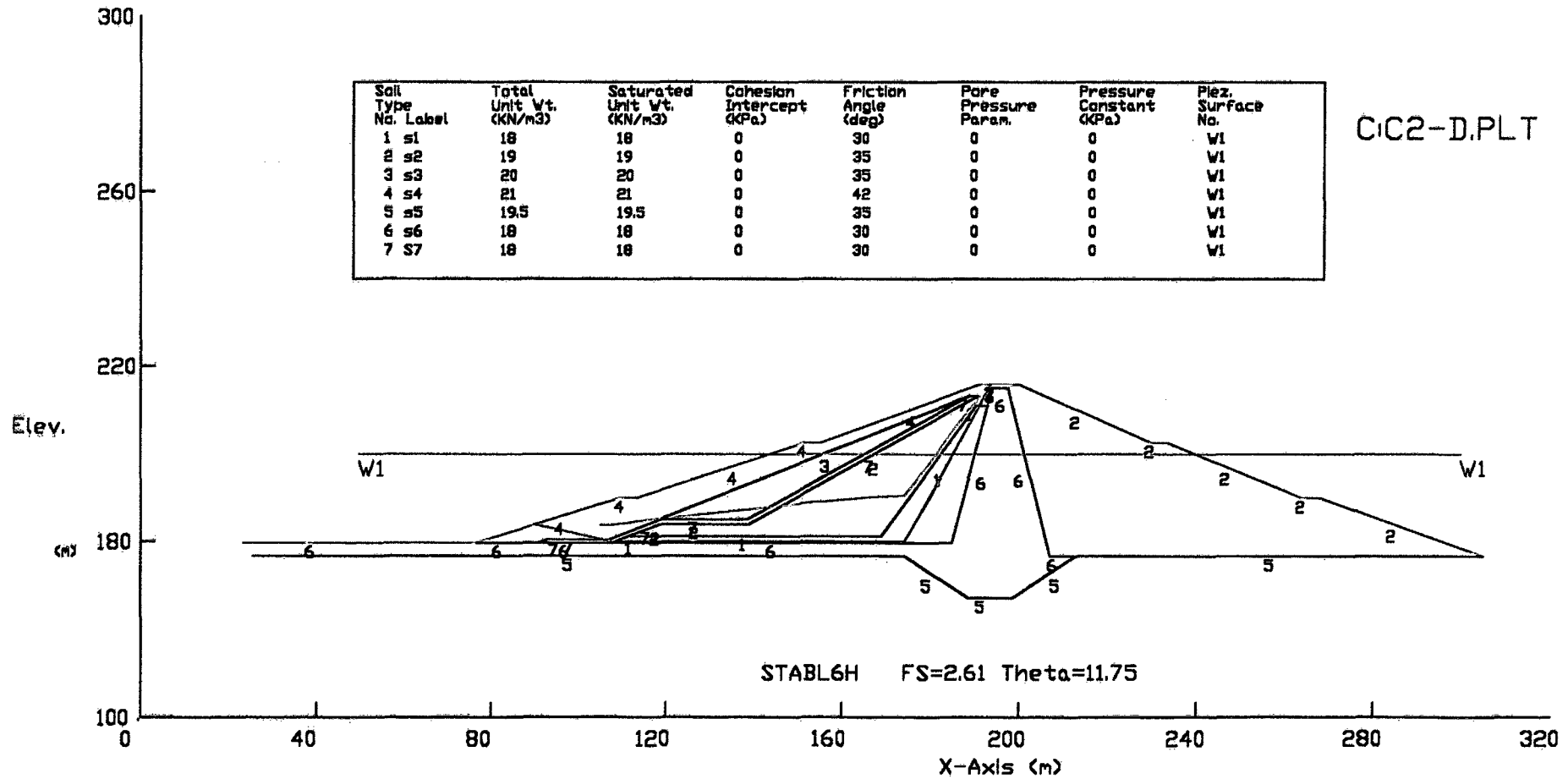


LAMINA:6-10

PRESA TINAJONES CASO 2-D (LARGO PLAZO) EMBALSE 200  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Saturated Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	W1
2 s2	19	19	0	35	0	0	W1
3 s3	20	20	0	35	0	0	W1
4 s4	21	21	0	42	0	0	W1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 s6	18	18	0	30	0	0	W1
7 s7	18	18	0	30	0	0	W1

CIC2-D.PLT

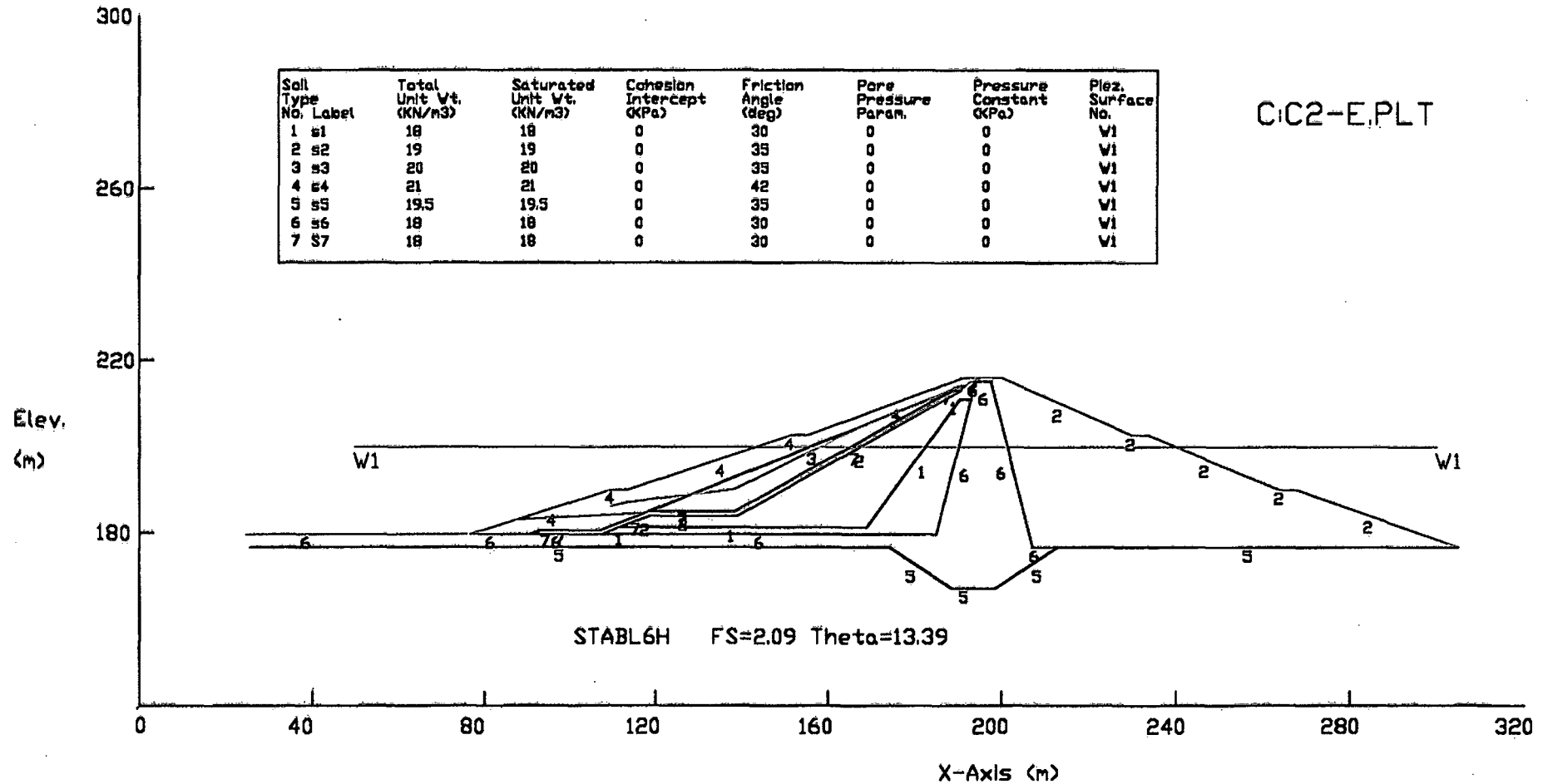


LAMINA:6-11

PRESA TINAJONES CASO 2-E (LARGO PLAZO) EMBALSE 200  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	V1
2 S2	19	19	0	35	0	0	V1
3 S3	20	20	0	35	0	0	V1
4 S4	21	21	0	42	0	0	V1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 S6	18	18	0	30	0	0	V1
7 S7	18	18	0	30	0	0	V1

CIC2-E.PLT

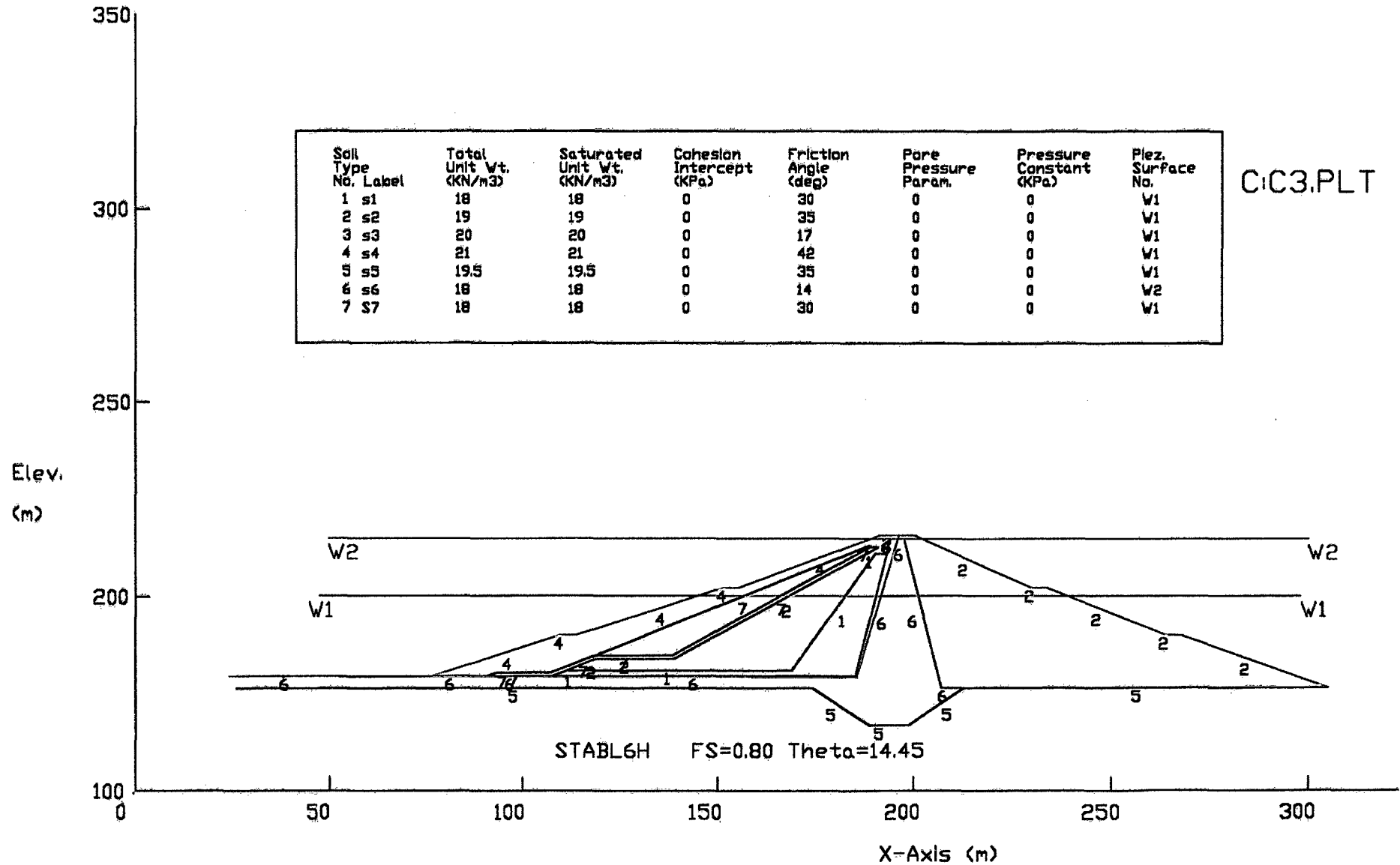




LAMINA: 6-12 PRESA TINAJONES CASO 3-A (CORTO PLAZO) W1=200 W2=215  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	W1
2 s2	19	19	0	35	0	0	W1
3 s3	20	20	0	17	0	0	W1
4 s4	21	21	0	42	0	0	W1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 s6	18	18	0	14	0	0	W2
7 s7	18	18	0	30	0	0	W1

C:\C3.PLT



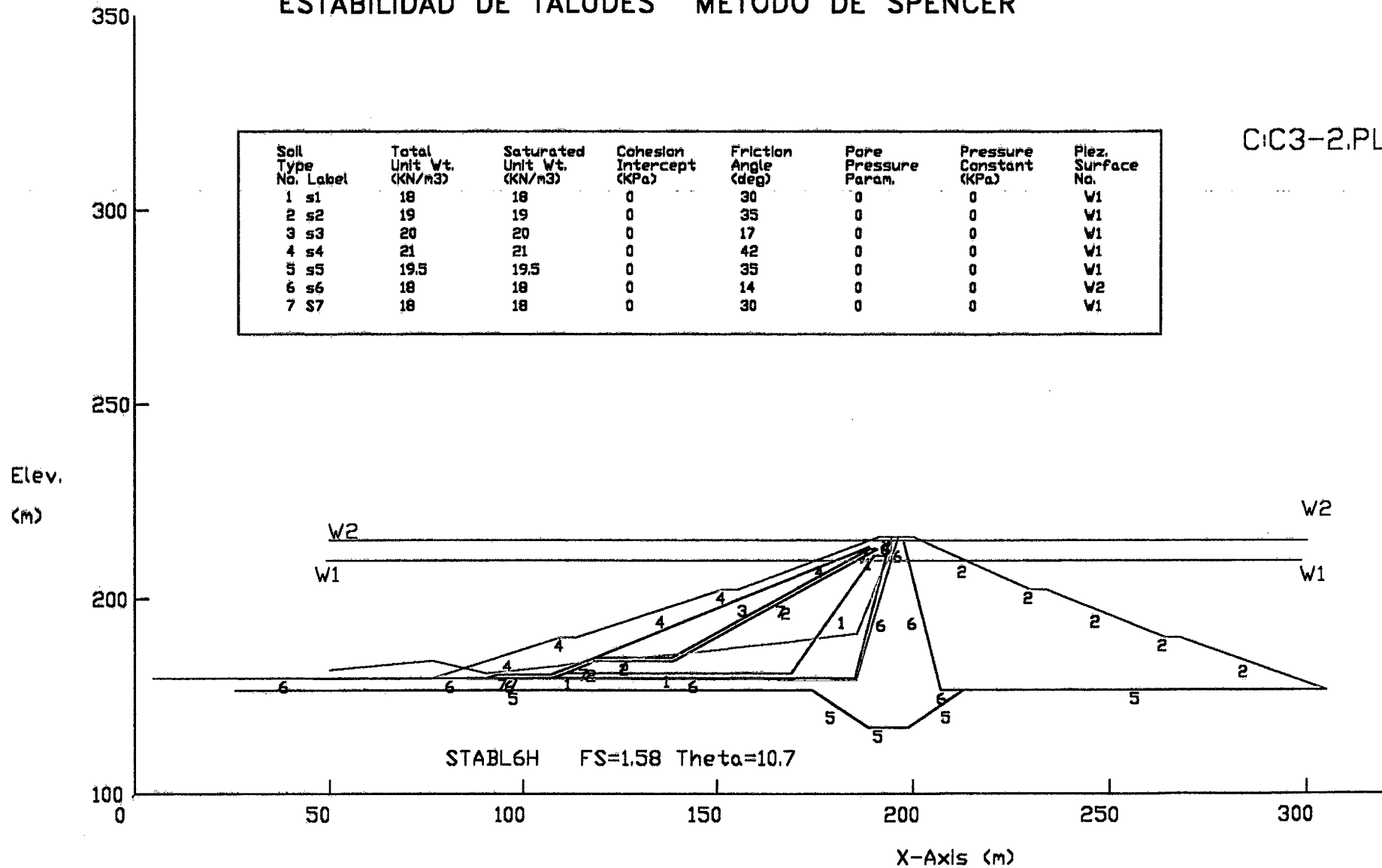
LAMINA:6-14

PRESA TINAJONES CASO 3-C (CORTO PLAZO) W1=210 W2=215 (nucleo)

ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

CIC3-2.PLT

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	W1
2 s2	19	19	0	35	0	0	W1
3 s3	20	20	0	17	0	0	W1
4 s4	21	21	0	42	0	0	W1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 s6	18	18	0	14	0	0	W2
7 s7	18	18	0	30	0	0	W1



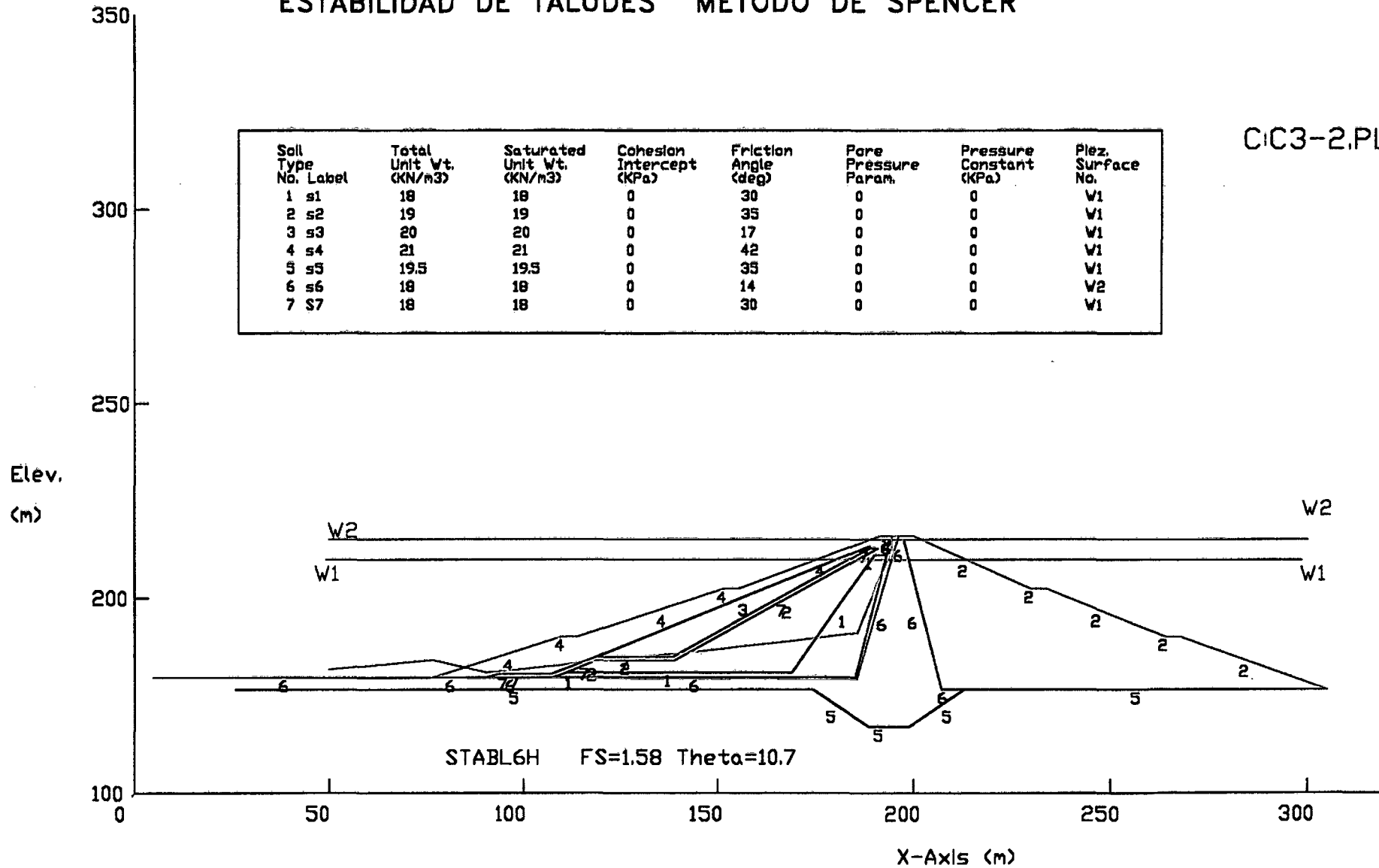
LAMINA:6-14

PRESA TINAJONES CASO 3-C (CORTO PLAZO) W1=210 W2=215 (nucleo)

ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

CIC3-2.PLT

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Saturated Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 s1	18	18	0	30	0	0	V1
2 s2	19	19	0	35	0	0	V1
3 s3	20	20	0	17	0	0	V1
4 s4	21	21	0	42	0	0	V1
5 s5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 s6	18	18	0	14	0	0	V2
7 s7	18	18	0	30	0 </tr		

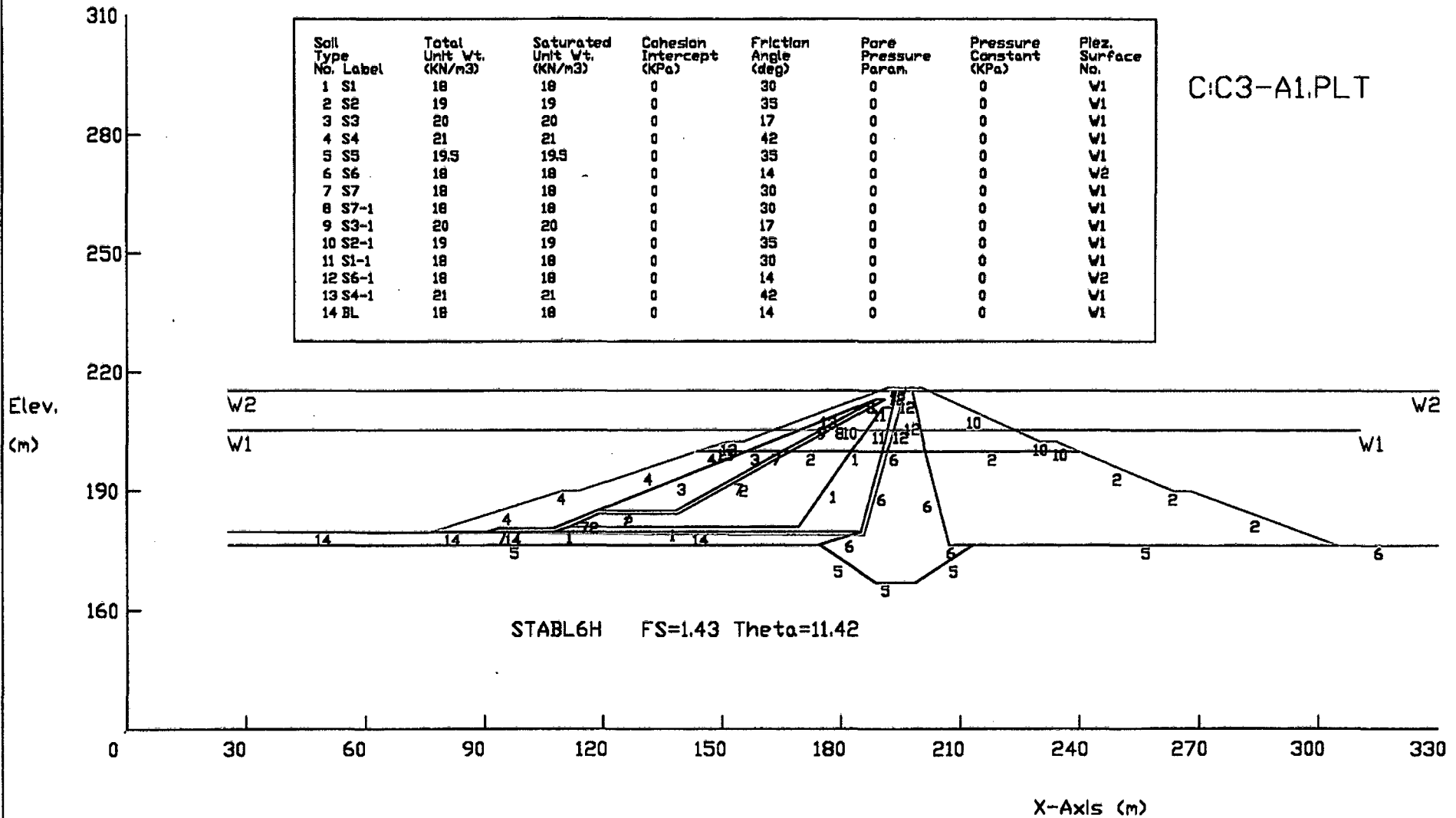


LAMINA:6-16

PRESA TINAJONES CASO 3-E (CORTO PLAZO) W1=205 BL W2=215 NUCLEO  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Saturated Unit Wt. (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	V1
2 S2	19	19	0	35	0	0	V1
3 S3	20	20	0	17	0	0	V1
4 S4	21	21	0	42	0	0	V1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 S6	18	18	0	14	0	0	V2
7 S7	18	18	0	30	0	0	V1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	V1
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	V1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	V1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	V1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	V2
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	V1
14 BL	18	18	0	14	0	0	V1

C:\C3-A1.PLT

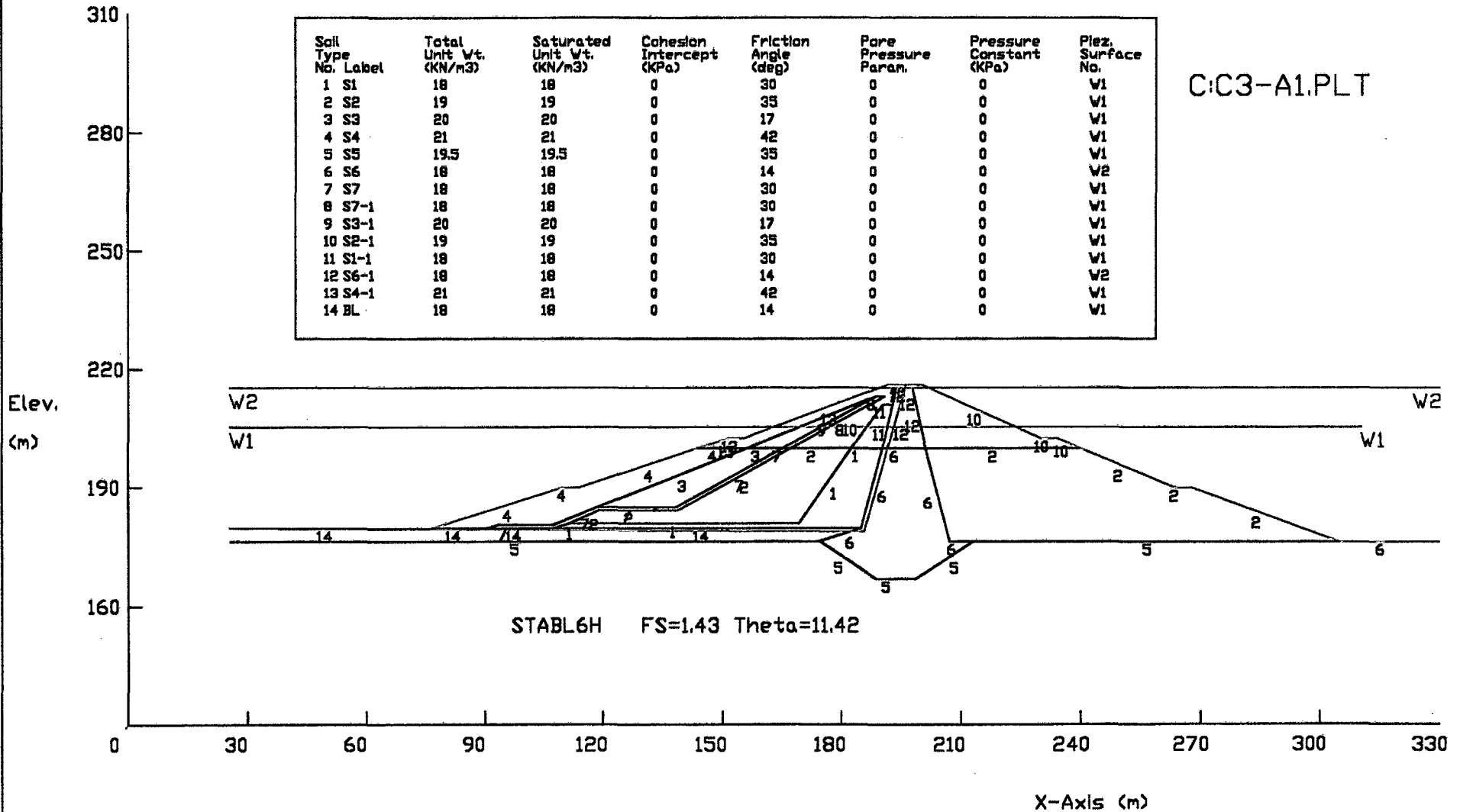


LAMINA:6-16

PRESA TINAJONES CASO 3-E (CORTO PLAZO) W1=205 BL W2=215 NUCLEO  
 ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	V1
2 S2	19	19	0	35	0	0	V1
3 S3	20	20	0	17	0	0	V1
4 S4	21	21	0	42	0	0	V1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 S6	18	18	0	14	0	0	V2
7 S7	18	18	0	30	0	0	V1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	V1
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	V1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	V1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	V1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	V2
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	V1
14 BL	18	18	0	14	0	0	V1

C:\C3-A1.PLT

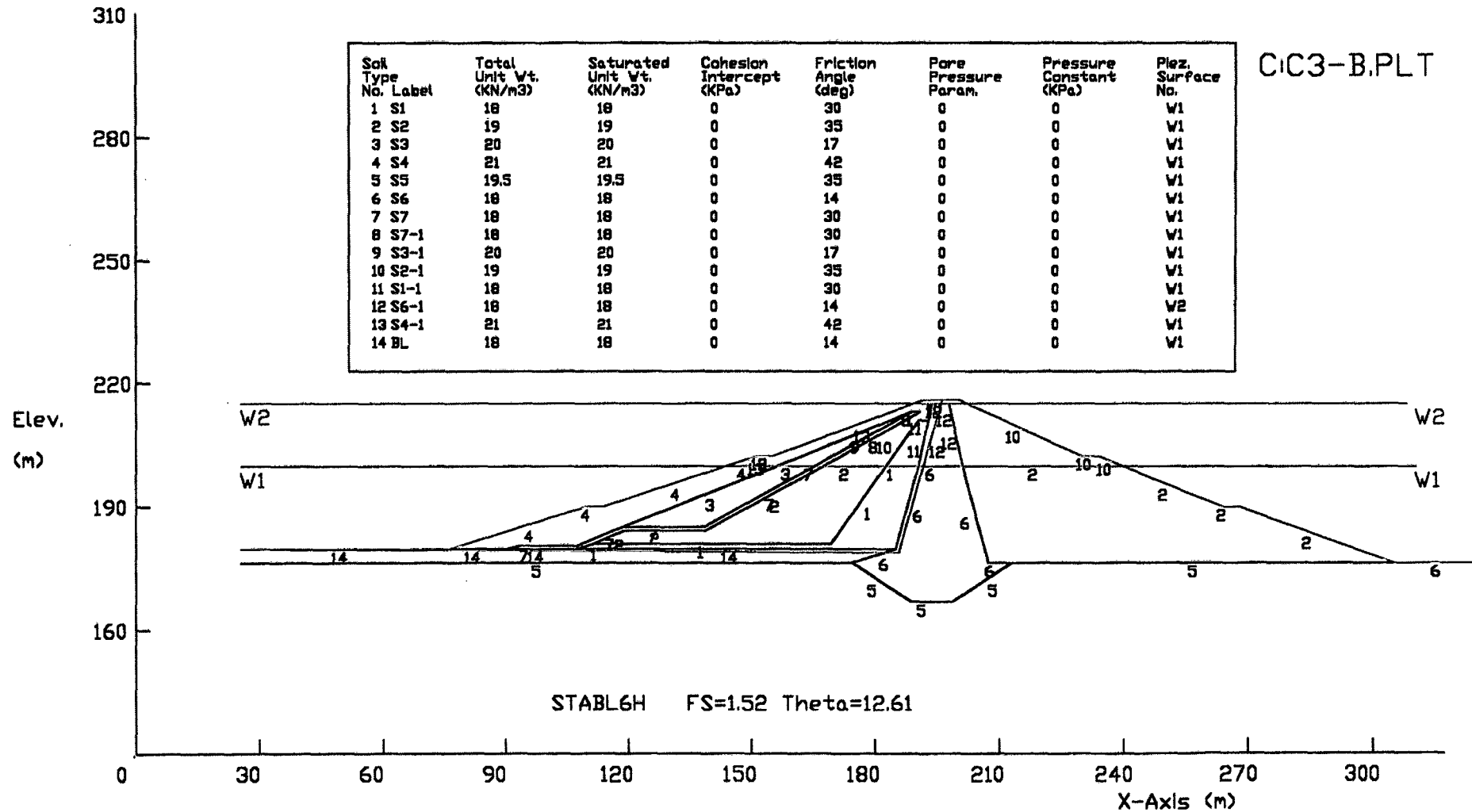


LAMINA:6-17

PRESA TINAJONES CASO 3-F (CORTO PLAZO) W1=200 W2=215 NUCLEO PARTE SUP  
ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

CIC3-B.PLT

Soil Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	W1
2 S2	19	19	0	35	0	0	W1
3 S3	20	20	0	17	0	0	W1
4 S4	21	21	0	42	0	0	W1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	W1
6 S6	18	18	0	14	0	0	W1
7 S7	18	18	0	30	0	0	W1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	W1
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	W1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	W1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	W1
12 S6-1	18	18	0	14	0	0	W2
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	W1
14 BL	18	18	0	14	0	0	W1

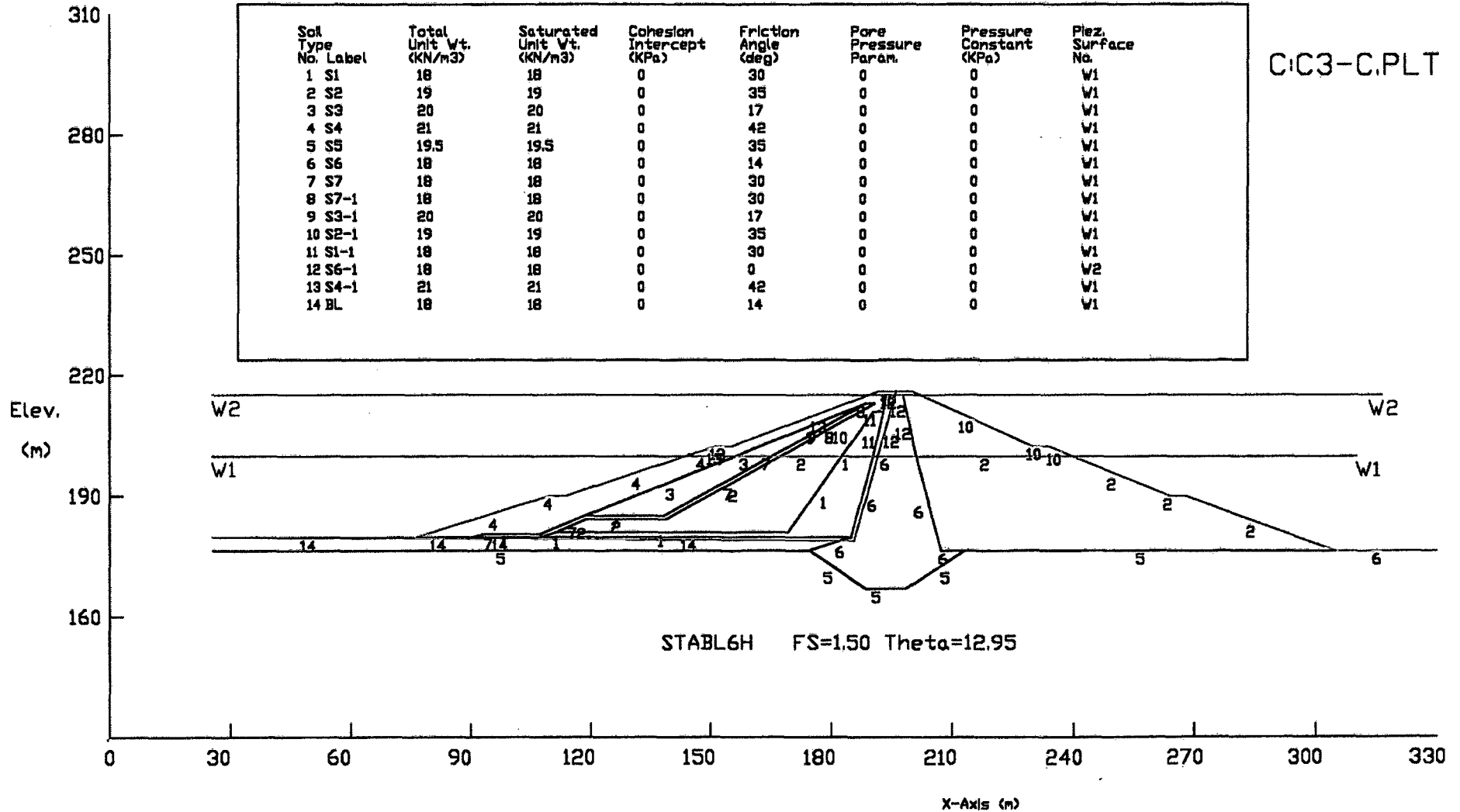


LAMINA:6-18

PRESA TINAJONES CASO 3-G (CORTO PLAZO) W1=200 W2=215 NUCLEO PARTE SUP  
ESTABILIDAD DE TALUDES METODO DE SPENCER

Sol. Type No. Label	Total Unit Wt. (KN/m3)	Saturated Unit Wt. (KN/m3)	Cohesion Intercept (KPa)	Friction Angle (deg)	Pore Pressure Param.	Pressure Constant (KPa)	Piez. Surface No.
1 S1	18	18	0	30	0	0	V1
2 S2	19	19	0	35	0	0	V1
3 S3	20	20	0	17	0	0	V1
4 S4	21	21	0	42	0	0	V1
5 S5	19.5	19.5	0	35	0	0	V1
6 S6	18	18	0	14	0	0	V1
7 S7	18	18	0	30	0	0	V1
8 S7-1	18	18	0	30	0	0	V1
9 S3-1	20	20	0	17	0	0	V1
10 S2-1	19	19	0	35	0	0	V1
11 S1-1	18	18	0	30	0	0	V1
12 S6-1	18	18	0	0	0	0	V2
13 S4-1	21	21	0	42	0	0	V1
14 BL	18	18	0	14	0	0	V1

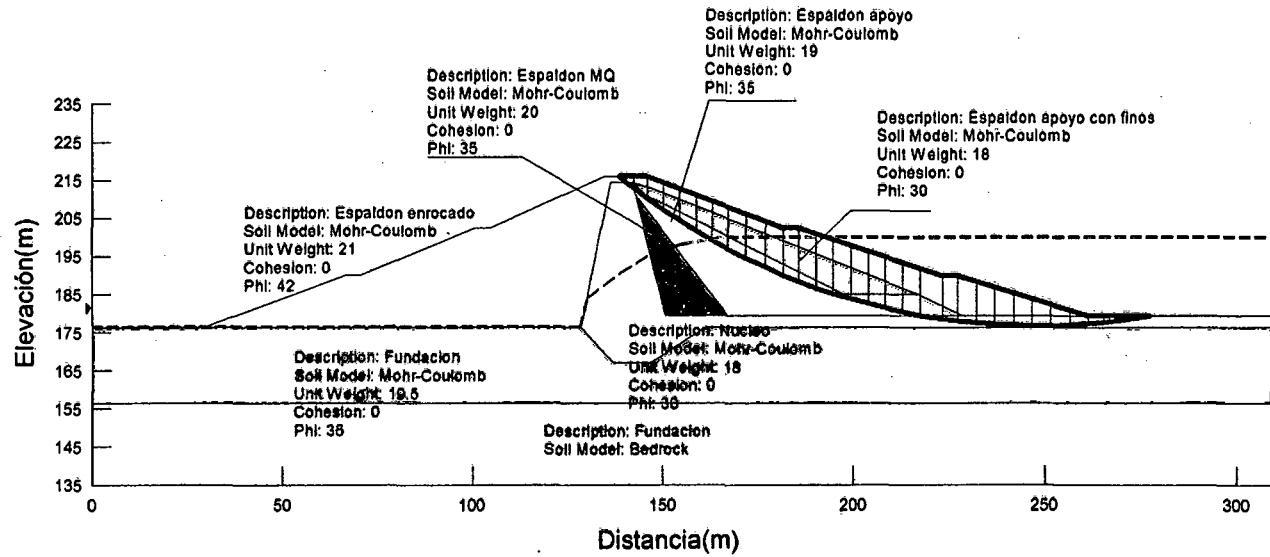
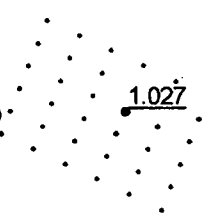
CIC3-C.PLT



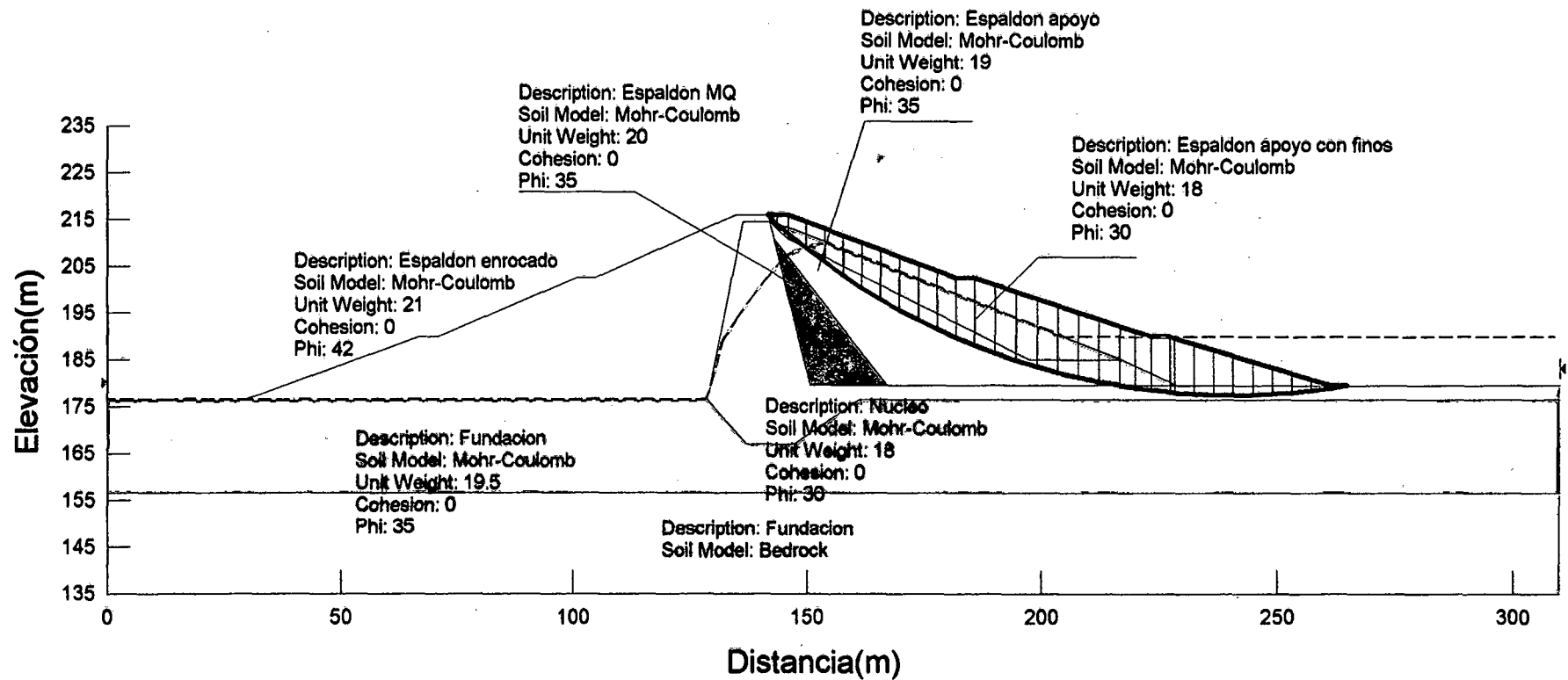
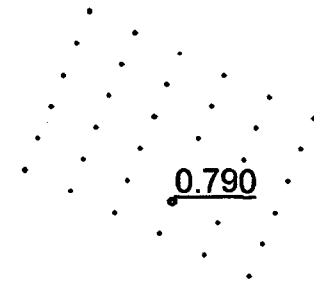
**RESULTADOS**  
**SLOPE 5.0**



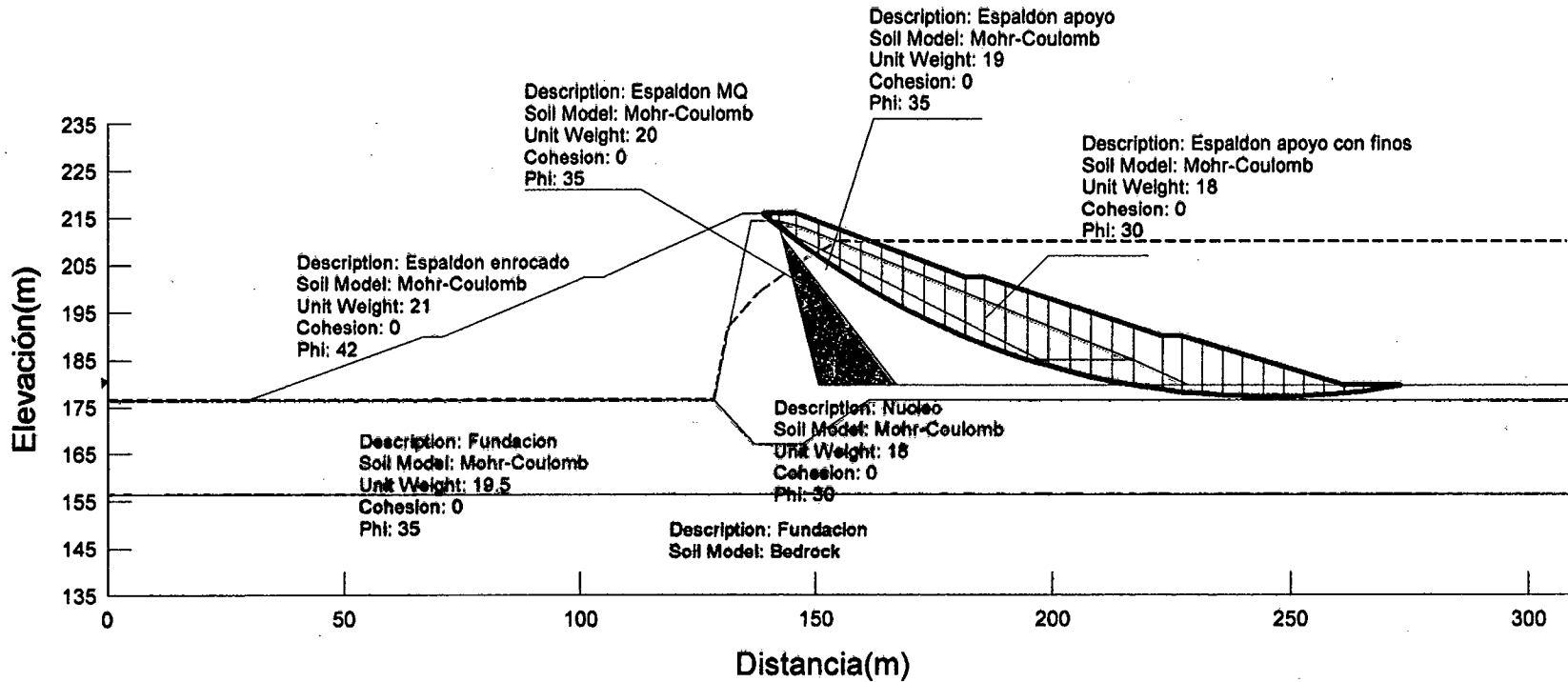
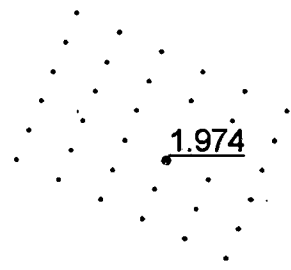
LAMINA 6-23  
 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDO ESTATICO  
 PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)  
 AGUAS ARRIBA  
 NIVEL DE EMBALSE 200 m.s.n.m  
 a=0.12g



**LAMINA 6-24**  
**ANALISIS DE ESTABILIDAD ESTADO**  
**PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)**  
**AGUAS ARRIBA**  
**DESEMBALSE RAPIDO**  
 210 a 190 m.s.n.m

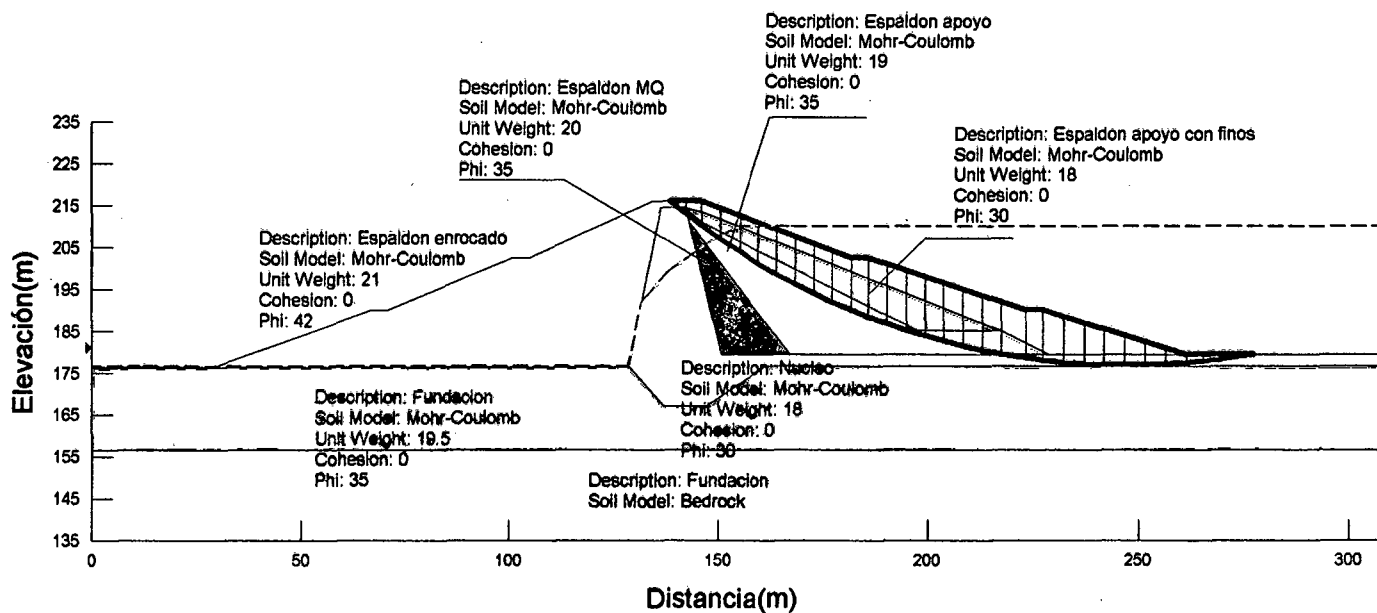


**LAMINA 6-18**  
**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTATICO**  
**PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)**  
**AGUAS ARRIBA**  
**NIVEL DE EMBALSE 210 m.s.n.m**

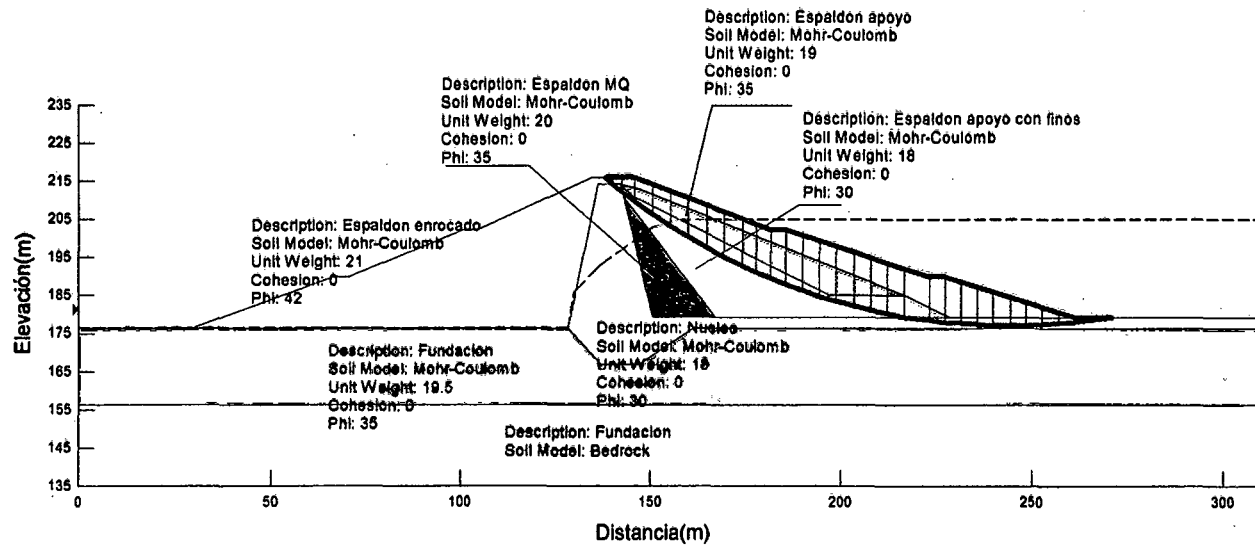
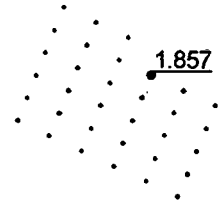


**LAMINA 6-19**  
**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDO ESTATICO**  
**PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)**  
**AGUAS ARRIBA**  
**NIVEL DE EMBALSE 210 m.s.n.m**  
**a=0.12g**

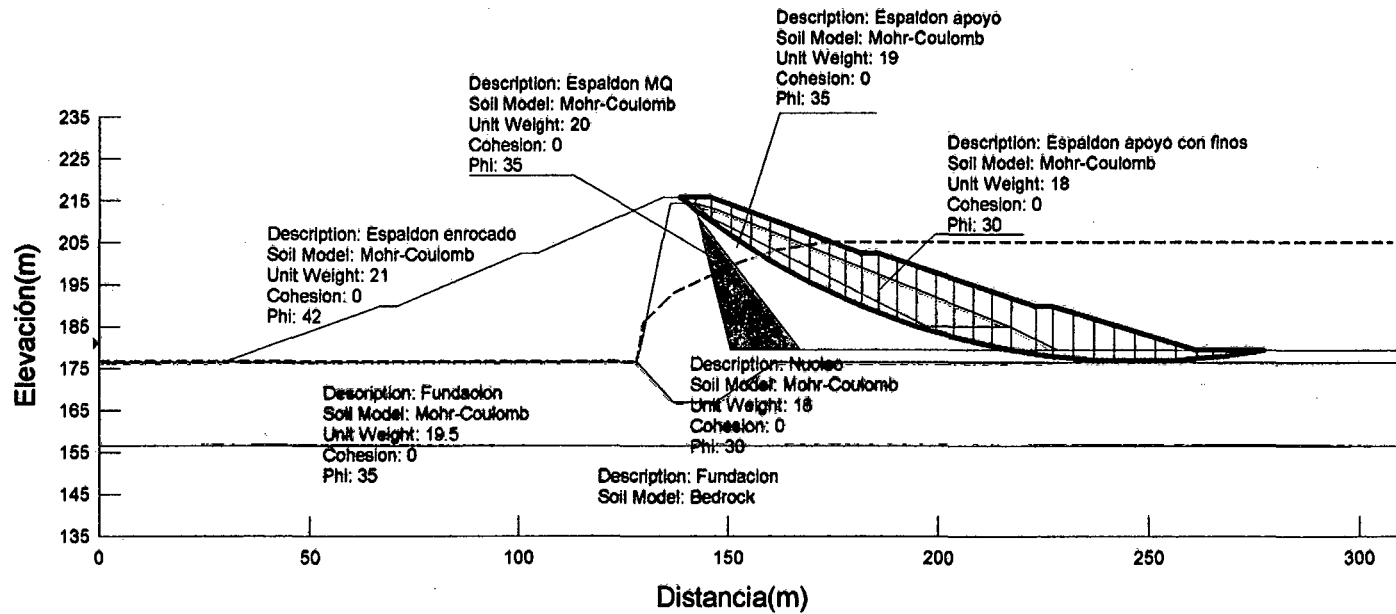
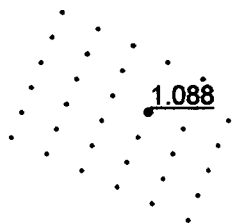
1.083



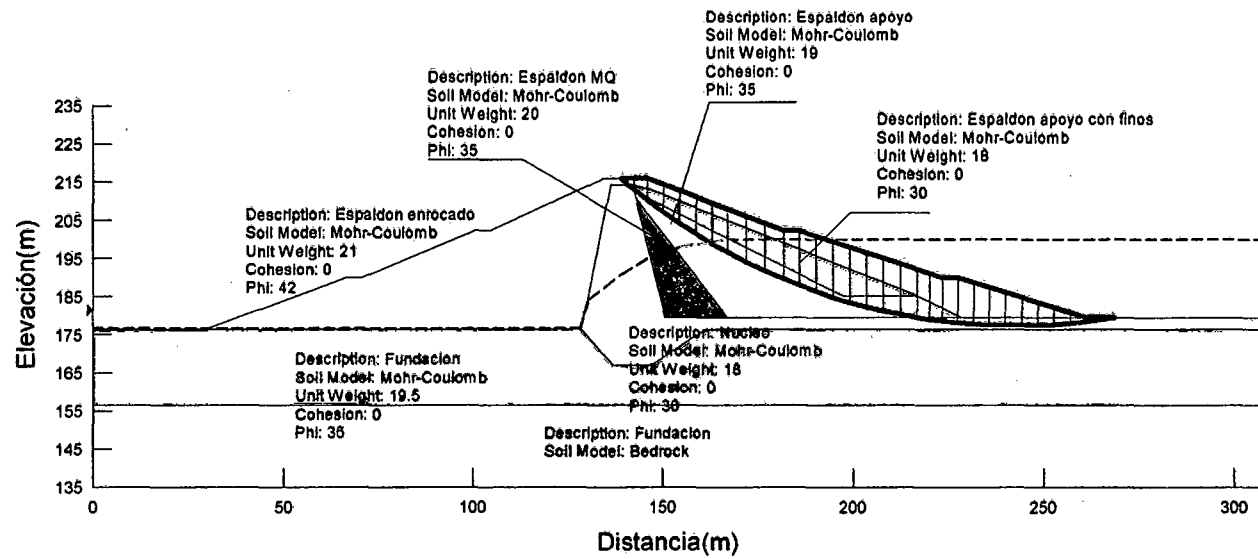
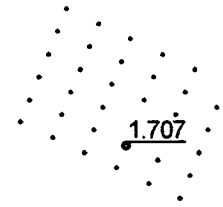
LAMINA 6-20  
 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTATICO  
 PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)  
 AGUAS ARRIBA  
 NIVEL DE EMBALSE 205 m.s.n.m



LAMINA 6-21  
 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDO ESTATICO  
 PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)  
 AGUAS ARRIBA  
 NIVEL DE EMBALSE 205 m.s.n.m  
 $a=0.12g$



LAMINA 6-22  
 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTATICO  
 PRESA TINAJONES(SECCION 1+850)  
 AGUAS ARRIBA  
 NIVEL DE EMBALSE 200 m.s.n.m



# **ESQUEMA DE REHABILITACION**



**ANEXO D**  
**ENSAYOS CAMPO Y LABORATORIO**

# **ENSAYOS DE CAMPO**

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-2 PROGRESIVA: 0+851**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
1.59	2.75	2.23	3.40	2.16
2.32	5.00	2.20	3.10	2.13
2.59	8.10	2.09	2.42	2.04
3.00	0.60	2.31	7.47	2.15
3.00	3.10	2.23	6.21	2.10
3.00	7.30	2.27	7.07	2.12
4.00	0.80	2.24	5.58	2.12
4.00	4.70	2.23	4.93	2.12
4.00	9.50	2.21	2.30	2.16
5.00	4.40	2.21	4.12	2.12
6.00	2.40	2.27		
6.00	6.00	2.23		

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-5 PROGRESIVA: 1+819**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
3.15	5.30	2.17	6.60	2.04
3.20	8.80	2.19	3.32	2.12
3.35	0.60	2.26	7.86	2.10
3.40	4.30	2.09	1.34	2.06
3.70	7.40	2.18	2.46	2.13
4.00	3.00	2.26	10.43	2.05
4.00	4.00	2.29	4.38	2.19
5.00	0.80	2.16	11.31	1.94
5.00	3.10	2.28		2.28
5.00	6.00	2.22	6.50	2.08
6.00	0.70	2.26	9.13	2.07
6.00	3.80	2.19	9.08	2.01
6.00	6.00			
6.00	6.70	2.28	8.02	2.11

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-6 PROGRESIVA: 1+985**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
3.50	0.70	2.06	1.49	2.03
3.80	3.85	2.12	3.65	2.05
3.80	6.70			
3.80	8.00	2.29		2.29
4.22	0.60	2.21	3.85	2.04
4.22	2.40	2.24	8.74	2.06
4.22	4.50	2.31	2.19	2.26
5.00	0.80	1.95	11.09	1.76
5.00	3.35	2.30	5.02	2.19
5.00	8.00		4.42	

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-7 PROGRESIVA: 2+135.65**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
3.35	0.45	2.16	6.65	2.03
3.45	2.90	2.33	3.38	2.25
3.60	7.10	2.16	1.82	2.12
4.00	0.25	2.04	4.90	1.94
4.00	4.30	2.28	2.93	2.22
4.00	7.85	2.22	1.43	2.19
4.30	6.90	2.31	3.94	2.22
5.00	0.30	2.24		2.24
5.00	5.50	2.15	6.10	2.03
5.00	1.90	2.21		2.21
5.00	4.40	2.23		2.23

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-8 PROGRESIVA: 1+350.3**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
3.35	0.45	2.23	8.32	2.06
3.35	4.80	2.20	2.70	2.14
3.75	2.40	2.17	1.86	2.13
4.00	0.30	2.25	6.16	2.12
4.00	2.60	2.22	4.37	2.13
4.00	5.60	2.16	0.77	2.14
4.00	8.00	2.20	1.73	2.16
5.00	0.70	2.04	6.97	1.91
5.00	3.50	2.30	3.99	2.21
5.00	6.00	2.28	3.45	2.20
6.00	0.80	2.12	12.09	1.89
6.00	3.00	2.25	1.69	2.21
6.00	5.20	2.21	4.08	2.12

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-9 PROGRESIVA: 1+950**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
0.70	0.65	2.04	2.13	1.99
1.31	3.55	2.17	3.10	2.10
1.70	2.65	2.28	4.56	2.18
1.70	0.50	1.91	7.09	1.78
1.85	4.90	2.11	1.65	2.08
2.50	6.10	2.07	1.48	2.04
2.50	7.10	2.24	2.69	2.18
3.00	0.50	2.27	7.56	2.11
3.00	2.70	2.27	2.97	2.20
3.00	4.80	2.32	1.38	2.29
3.00	6.65	2.28	1.15	2.25
4.00	0.70	2.10	7.08	1.96
4.00	3.35	2.32	4.65	2.22
5.00	1.30	2.27	10.99	2.05
5.00	3.00	2.28	5.38	2.16
5.00	5.30	2.33	5.61	2.21
6.00	0.60	2.10	6.98	1.96
6.00	3.00	2.14	4.87	2.04
6.00	5.00	2.08	2.32	2.03
3.60	7.90	2.28	2.22	2.23

**DENSIDAD DE CAMPO  
TRINCHERA T-10 PROGRESIVA: 1+850**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>	<b>DH (t/m3)</b>	<b>W (%)</b>	<b>DS (t/m3)</b>
0.90	0.75	2.04	2.64	1.99
1.45	3.20	2.29	2.07	2.24
2.05	6.20	1.74	3.81	1.68
2.00	0.90	2.29	3.01	2.23
2.00	1.95	2.25	0.93	2.23
2.00	4.70	2.17	1.34	2.15
3.00	0.50	2.27	8.55	2.09
3.00	2.85	2.28	3.55	2.20
3.00	5.15	2.22	3.30	2.15
3.45	6.60	2.22	2.98	2.16
4.00	0.70	2.26	9.71	2.06
4.00	4.20	2.26	4.17	2.17
5.00	0.30		5.87	
5.00	1.90		3.90	
5.00	4.40		4.72	
6.10	2.00	2.29	6.62	2.15

ENSAYO DE PERMEABILIDAD  
PERFORACION P-1

PRO ENSAYO	LONGITUD ENSAYO	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	DT (s)	DH*10E-3 (m)	D1*10E-3 (m)	D2*10E-3 (m)	VOL m3	Q m3/S	HT	A m2	K cm/s
5-5.6	0.6	0	5	0.6	5	300	79	81	1.47E-03	2.94E-04	0.50	0.15780	7.45E-02
8.0-10.0	2	0.2	8.8	1.2	70	20	107	87	7.19E-05	1.03E-06	0.02	0.33390	2.64E-04
15-15.65	0.65	0	15	0.65	1322	10	110	97	3.80E-05	2.88E-08	0.02	0.20540	6.88E-07
30-30.3	0.3	0.15	30	0.3	133	20	107	87	7.19E-05	5.41E-07	0.07	0.08794	6.94E-05
39.75-40.5	0.75	0.15	39.75	0.75	77	15	111	96	5.81E-05	7.54E-07	0.02	0.23340	2.10E-04
44.65-45.65	1	0.15	44.65	1	82	14	111	96	5.42E-05	6.61E-07	0.01	0.30883	1.86E-04
48.8-49	0.5	0	48.5	0.5	44	78	79	81	1.53E-04	3.48E-06	0.16	0.13239	3.82E-04
70	0	0.5	70	0	24	155	85	90	3.52E-04	1.47E-05		0.00636	

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD  
PERFORACION P-2**

PRO ENSAYO	LONGITUD ENSAYO	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	DT (s)	DH*10E-3 (m)	D1*10E-3 (m)	D2*10E-3 (m)	VOL m3	Q m3/S	A m2	K cm/s	
4.5-5.0	0.5	0.58	4.5	0.5	1	300	84	88	6.65E-04	6.65E-04	0.60	0.14431	7.68E-01
9.5-10.0	0.5	0.58	9.5	0.5	12	21	84	88	4.66E-05	3.88E-06	0.04	0.14431	5.33E-03
14.5-15	0.5	0.6	14.5	0.5	7	62	86	89	1.44E-04	2.06E-05	0.12	0.14602	1.62E-02
19.22-20.00	0.8	0.58	19.2	0.8	16.5	20	68	72	2.91E-05	1.76E-06	0.03	0.18503	2.31E-03
24.5-25	0.5	0.58	24.5	0.5	28	20	68	72	2.91E-05	1.04E-06	0.04	0.11717	7.91E-04
29.5-30	0.5	0.58	29.5	0.5	56	50	68	72	7.26E-05	1.30E-06	0.10	0.11717	1.98E-04

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD  
PERFORACION P-3**

PRO ENSAYO	LONGITUD ENSAYO	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	DT (s)	DH*10E-3 (m)	D1*10E-3 (m)	D2*10E-3 (m)	VOL m3	Q m3/S	I	A m2	K cm/s
5-5.6	0.6	0.35	5	0.6	2	710	111	95	2.75E-03	1.37E-03	1.18	0.186159	3.12E-01
20-20.65	0.65	0.35	20	0.65	82	20	111	114	7.74E-05	9.44E-07	0.03	0.243000	3.83E-04
24.5-25	0.5	0.35	24.5	0.5	114	12	111	114	4.65E-05	4.07E-07	0.02	0.189278	7.87E-05
29.2-30	0.8	0.35	29.5	0.8	42	50	111	114	1.94E-04	4.61E-06	0.06	0.296721	5.92E-04
34.05-35	0.95	0.35	34.05	0.95	174	10	111	114	3.87E-05	2.22E-07	0.01	0.350442	3.47E-05
40-40.65	0.65	0.35	40	0.65	132	10	111	114	3.87E-05	2.93E-07	0.02	0.243000	5.94E-05
44.5-45	0.5	0.35	44.5	0.5	52	10	111	114	3.87E-05	7.44E-07	0.02	0.189278	3.78E-04
47	0	0.35	47	0	12	200	84	88	4.43E-04	3.69E-05		0.006082	
48.92-49.3	0.42	0.35	48.92	0.42	13	10	84	88	2.22E-05	1.71E-06	0.02	0.122196	4.51E-03
50	0	0.35	50	0	16	50	84	88	1.19E-04	7.43E-06		0.006081	



**ENSAYO DE PERMEABILIDAD  
PERFORACION P-4**

PRO ENSAYO	LONGITUD ENSAYO	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	DT (s)	DH*10E-3 (m)	D1*10E-3 (m)	D2*10E-3 (m)	VOL m3	Q m3/S	I	A m2	K cm/s
4.5-5	0.5	0.25	4.5	0.5	3	20	84	88	4.43E-05	1.48E-05	0.04	0.1443125	5.12E-02
9.5-10	0.5	0.25	9.5	0.5	28.5	10	84	88	2.22E-05	7.78E-07	0.02	0.1443125	5.39E-03
14.5-15	0.5	0.25	14.5	0.5	32	5	84	88	1.11E-05	3.46E-07	0.01	0.1443125	4.80E-03
19.5-20	0.5	0.25	19.5	0.5	6	20	84	88	4.43E-05	7.39E-06	0.04	0.1443125	2.56E-02
24.5-25	0.5	0.25	24.5	0.5	5	20	68	72	2.91E-05	5.81E-06	0.04	0.1171691	2.48E-02
29.5-30	0.5	0.25	29.5	0.5	7	20	68	72	2.91E-05	4.15E-06	0.04	0.1171691	1.77E-02

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD  
PERFORACION P-5**

PRO. ENSAYO	LONGITUD ENSAYO	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	DT (s)	DH*10E-3 (m)	D1*10E-3 (m)	D2*10E-3 (m)	VOL m3	Q m3/S	f	A m2	K cm/s
5-5.65	0.65	0.21	5	0.65	14	78	111	96	3.02E-04	2.16E-05	0.12	0.203274	6.31E-03
10-10.65	0.65	0.6	10	0.65	5	300	86.5	88	7.05E-04	1.41E-04	0.46	0.185782	3.29E-02
14-15	1	0.1	14	1	11	90	111	96	3.48E-04	3.17E-05	0.09	0.308832	1.04E-02
15-15.65	0.65	0.1	15	0.65	60	64	111	96	2.48E-04	4.13E-06	0.10	0.203274	3.44E-04
20-20.65	0.65	0.53	20	0.65	10	300	86	96	6.97E-04	6.97E-05	0.46	0.203274	7.43E-03
25-25.65	0.65	0	25	0.65	13	76	111	96	2.94E-04	2.26E-05	0.12	0.203274	7.32E-03
30-30.65	0.65	0.16	30	0.65	106	20	111	96	7.74E-05	7.30E-07	0.03	0.203274	1.10E-04
40-40.65	0.65	0	40	0.65	176	10.5	111	96	4.06E-05	2.31E-07	0.02	0.203274	4.00E-05
49.35-49.85	0.5	0.52	49.35	0.5	60	46	86	89	1.07E-04	1.78E-06	0.09	0.146022	2.21E-04
52.3-53	0.7	0.55	53.2	0.7	32	50	84	88	1.11E-04	3.46E-06	0.07	0.194605	7.59E-04
53.5-55	1.5	0.55	53.5	1.5	10	31	86	89	7.20E-06	7.20E-07	0.02	0.425625	8.19E-03