



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**GEOTECNIA DEL P.H. CHICOASEN
Y ANALISIS DE LA ZONA
INESTABLE**

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el Título de

INGENIERO GEOLOGO

P r e s e n t a

RAUL F. VERDUZCO MURILLO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

			Pág.
RESUMEN			1
CAPITULO	I	GENERALIDADES	2
	I.1	Introducción	2
	I.2	Objetivo del Estudio	3
	I.3	Localización	3
	I.4	Fisiografía	4
	I.4.1	Geomorfología	5
	I.4.2	Aspectos Hidrológicos	6
	I.5	Descripción de las Obras	7
CAPITULO	II	GEOLOGIA GENERAL DEL EMBALSE	10
	II.1	Trabajos Previos	11
	II.2	Estratigrafía	12
	II.3	Geología Estructural	15
CAPITULO	III	GEOTECNIA EN EL SITIO DE LA OBRA	17
	III.1	Estudios Previos	17
	III.2	Secuencia Litológica Geotécnica	18
	III.3	Discontinuidades	22
	III.4	Estructuras Locales	23
	III.5	Permeabilidad e Inyecciones	25
	III.6	Riesgo Sísmico	27
CAPITULO	IV	ANALISIS DE LA ZONA INESTABLE	29
	IV.1	Exploraciones a Detalle	30
	IV.2	Fundamentación Teórica y Experimental	30
	IV.3	Métodos de Análisis	34
	IV.3.1	Análisis en Condiciones Estáticas	34
	IV.3.2	Análisis en Condiciones Dinámicas	38
	IV.4	Conclusiones y Recomendaciones	40
		BIBLIOGRAFIA	47

R E S U M E N

En este trabajo, se describen las condiciones geológicas y los trabajos geotécnicos que antecedieron a la construcción de la Presa Chicoasén en el Estado de Chiapas y sobre el río Grijalva. Se describe, con detalle, la estabilidad de una zona potencial de deslizamiento en la margen izquierda aguas arriba de la boquilla de la presa. En este trabajo se supone un deslizamiento por el plano más crítico, el cual lo constituye el contacto de la unidad litológica UI con la U2. La unidad litológica UI consiste de calizas con interestratificación de arcilla, la Unidad U2 consiste de calizas masivas. El método geotécnico usado se describe detalladamente. Este modelo es un análisis de estabilidad bidimensional, en el que; intervienen variaciones en el nivel freático, variaciones en el ángulo de fricción y distintas aceleraciones para un sismo.

Los resultados, están graficados para cada sección-analizada, finalmente se concluye sobre el uso del método y se aportan algunas recomendaciones racionales para la solución de la estabilidad de la zona en cuestión.

CAPITULO I GENERALIDADES

I.1 INTRODUCCION

Previo a la construcción de una presa, es necesario, hacer el estudio geotécnico apoyado en la geología de la localidad, a fin de conocer la estanqueidad del embalse, el grado de sismicidad de la zona y su posible desarrollo durante el llenado y operación de la misma, las condiciones de la roca para la cimentación, el grado de permeabilidad de las mismas, las condiciones de excavación y la forma de tratar a las márgenes y a las zonas de desplante, la existencia de zonas inestables bajo condiciones de operación de la presa, la disponibilidad de materiales de buena calidad y así como otros factores que pueden considerarse secundarios, para el objetivo de este trabajo.

1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El propósito del presente estudio fue determinar --- cuantitativamente la estabilidad de una parte de la margen izquierda de la Presa Chicoasén, denominada "zona inestable"

El volúmen de roca susceptible a deslizarse fue cuantificado en 8×10^6 m³ de los cuales 5×10^6 m³ quedarían bajo el NAMO, empero los 3×10^6 m³ restantes darían origen al momento de deslizarse, a una gran ola que dañaría a la cortina, dada la cercanía con la misma. (fig. 1.1a)

Para lograr el objetivo fue necesario realizar análisis numéricos fundamentados en levantamientos geológicos y geofísicos de detalle (rumbos y echados, densidad y dimensión del fracturamiento, espesor de las unidades litológicas, medición de velocidades de ondas sísmicas, etc.) así como características hidráulicas (variación del nivel freático) y geometría del talud. Todos estos datos fueron obtenidos en el campo. Por otro lado, se efectuaron estudios de gabinete y laboratorio, tales como: determinación de el Coeficiente Sísmico de la zona, la ley de resistencia al corte de la roca, la resistencia a la compresión simple, etc.,

El resultado de los estudios antes mencionados, mostró la porción estable y la inestable de la "zona inestable", así como las condiciones de estabilidad de esa zona.

1.3 LOCALIZACION

La presa Chicoasén se encuentra ubicada en el Estado de Chiapas, sobre el Río Grijalva, a 40 Km. al norte de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Las Coordenadas geográficas son:

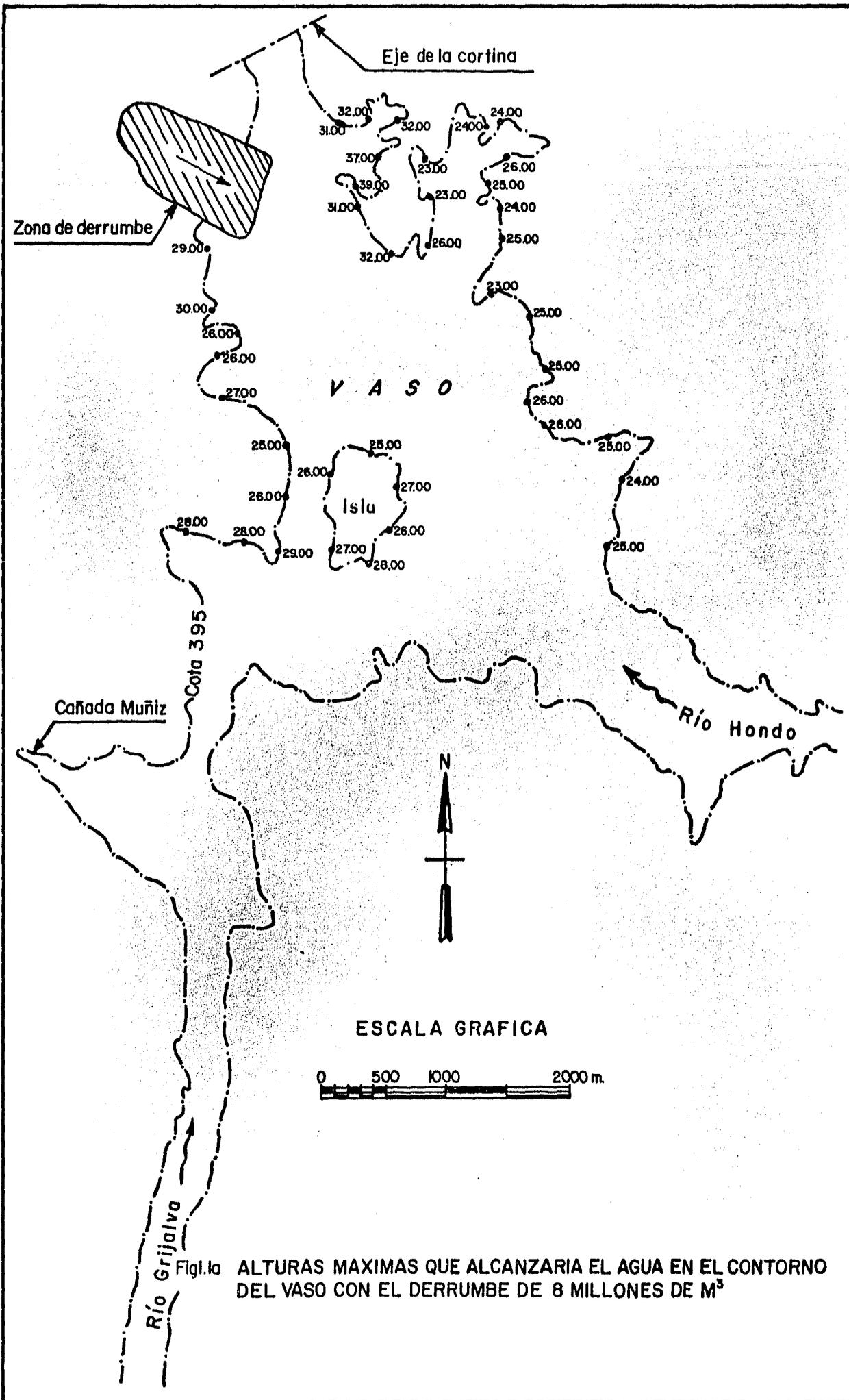


Fig. 1a ALTURAS MAXIMAS QUE ALCANZARIA EL AGUA EN EL CONTORNO DEL VASO CON EL DERRUMBE DE 8 MILLONES DE M³

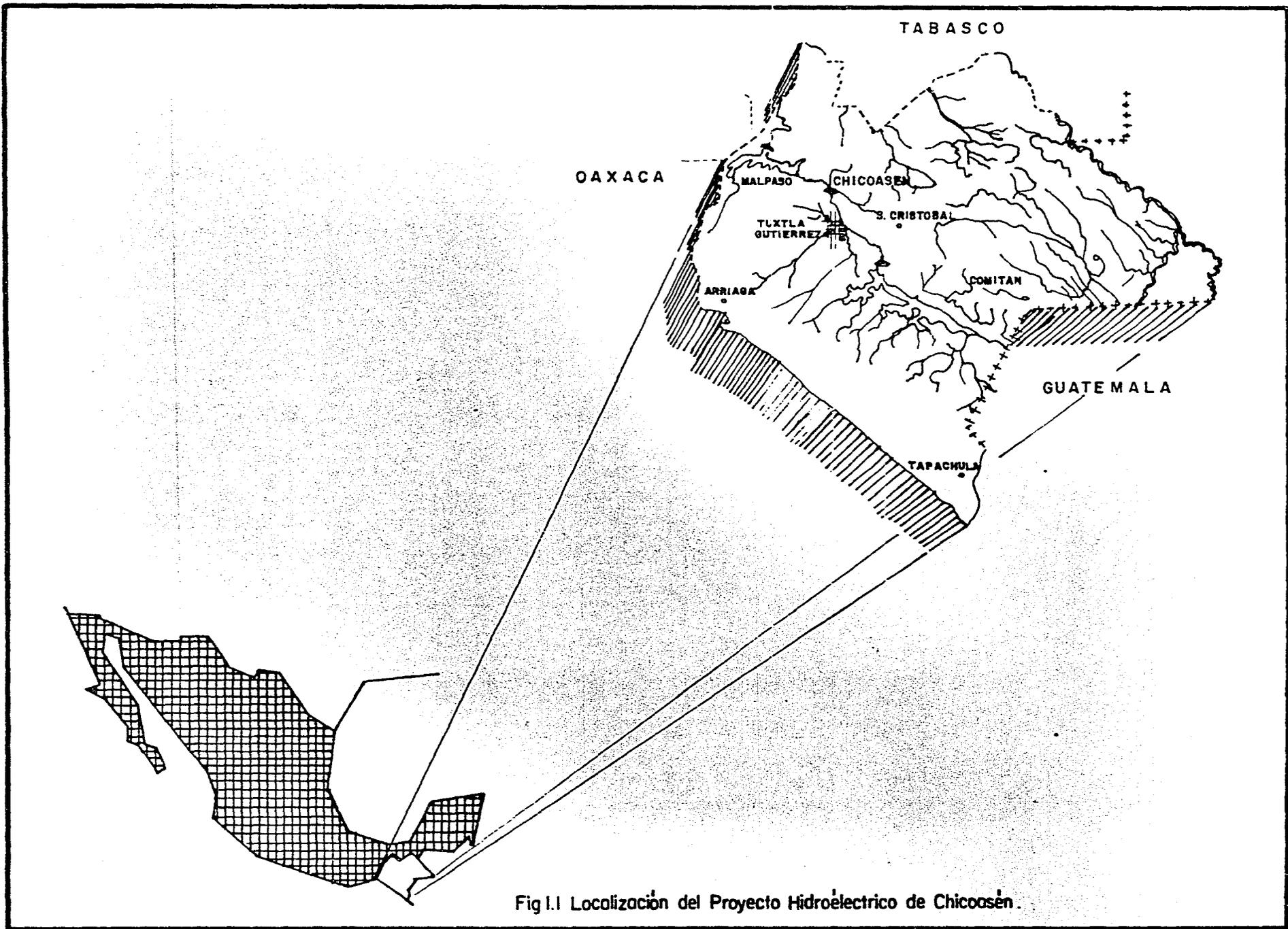


Fig.1.1 Localización del Proyecto Hidroeléctrico de Chicoasén.

93°06' Longitud Oeste

16°57' Latitud Norte

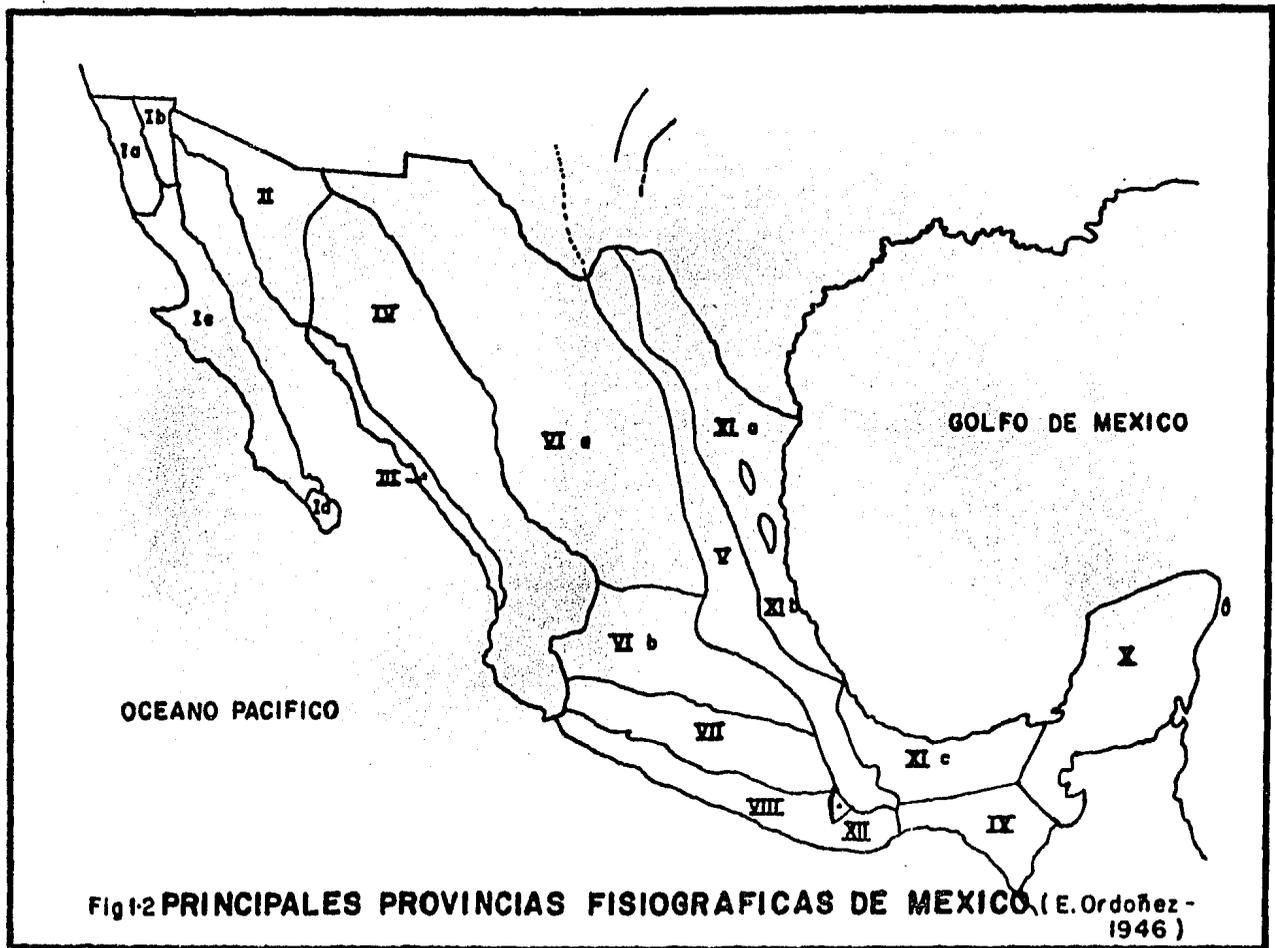
El acceso al sitio se efectúa por carretera asfaltada construída exprofeso para la obra (fig.1.1), la distancia entre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, (Capital del Estado) y el sitio de la obra es de 42 km. Esta ciudad es atravesada por la carretera federal No.120 que parte de La Ventosa, Oaxaca y termina en Frontera Comalapa, Chiapas.

I.4 FISIOGRAFIA

La presa Chicoasén se ubica en la subprovincia fisiográfica denominada Meseta Central de Chiapas, perteneciente a la Provincia de Chiapas (fig.I.2) (E. Ordoñez, 1946).

La Meseta Central de Chiapas está formada principalmente por calizas del Cretácico, la parte alta está esencialmente compuesta por capas variadas de arenisca, lutitas y margas del Plioceno, aunque se puede encontrar también material detrítico y tobas más o menos erosionadas. (E. Ordoñez, 1946)

Existen tres características peculiares de la Meseta Central de Chiapas (Böse, Saper 1946); la primera es la existencia de una zona ancha constituída de rocas sedimentarias marinas terciarias, con semejanza con las de la llanura costera del Golfo de México: la segunda, en la que se ubica la presa Chicoasen, caracterizada por grandes áreas de rocas cretácicas levantadas, plegadas y cortadas por fallas escalonadas hacia el norte y tercera, la existencia de rocas graníticas de las sierras frente al Pacífico, emergidas desde el Paleozoico (Böse et al, 1946).



P R O V I N C I A S

- I BAJA CALIFORNIA
 - a) Región de Ensenada
 - b) Delta del Colorado
 - c) Península del Colorado
 - d) Región del Cabo
- II DESIERTO DE SONORA
- III FAJA COSTERA DE SINALOA Y NAYARIT
- IV SIERRA MADRE OCCIDENTAL
- V SIERRA MADRE ORIENTAL
- VI MESA CENTRAL MEXICANA
 - a) Mesa Central del Norte
 - b) Mesa Central del Sur

- VII CUENCA DEL BALSAS
- VIII SIERRA MADRE DEL SUR
- IX PROVINCIA DE CHIAPAS
- X PENINSULA DE YUCATAN
- XI FAJA COSTERA DEL GOLFO DE MEXICO
 - a) Región del Río Bravo
 - b) Región de la Huasteca
 - c) Istmo de Tehuantepec
- XII VALLE DE OAXACA

I.4.1 GEOMORFOLOGIA

De acuerdo a los datos topográficos y geológicos, se estableció el panorama geomorfológico estructural de la zona del embalse (N.P. Kostenko, R. Rivapalacio, 1977).

En la zona se pueden inferir dos ciclos de desarrollo.

El antiguo, que formó valles amplios y el más joven que originó el cañón del río Grijalva.

El relieve antiguo está representado por planicies del Cenozoico Superior, levantadas a diferentes alturas, que oscilan entre 1000 y 1500 m.

El relieve joven está representado por cañones profundos y grandes escarpes, a los cuales corresponden etapas de levantamiento rápido de las antiguas planicies.

Se supone un levantamiento rápido ya que los procesos exógenos no alcanzaron a actuar y solamente el río principal (Grijalva) pudo sobrepasar al levantamiento. El levantamiento de la planicie ocurrió de forma homogénea, aunque se presenta también basculamiento de los bloques que hoy en día constituyen la zona.

La intensa actividad tectónica, ha dado origen a estructuras poco comunes, tales como: horst-anticlinales y --- horst-sinclinales, grabenes sinclinales y anticlinales, como bloques de modo que un sinclinal está levantado entre dos fallas representando un Horst.

Las formas orográficas permiten suponer que los sinclinales corresponden frecuentemente a las partes altas del -

relieve, lo que implica que los pliegues precuaternarios -- son estructuras inactivas. Los principales levantamientos y depresiones están limitadas por fallas que forman bloques.

Existen tres zonas características de las antiguas planicies: Zona norte (COPAINALA), Zona Central (CHICOASEN) y Zona Sur (SUMIDERO).

Es notorio un escalonamiento de norte a sur de las tres zonas, infiriéndose una mayor y más reciente actividad en la Zona Central (N.P. Kostenko, 1977). Esto ha dado origen a bloques pequeños que pueden ser inestables. Este factor es un riesgo que se tomó para decidir la construcción de la presa.

I.4.2 ASPECTOS HIDROLOGICOS

La cuenca de la Presa Chicoasén, consta de un área de 26,030 Km², (fig.1.3), con una precipitación la cual varía, dependiendo de la zona, desde 1,500 mm., hasta de 3,000 mm., principalmente hacia el oriente. El escurrimiento medio anual es de $11,833 \times 10^6$ m³. El gasto promedio de 380 m³/seg., habiendo registrado avenidas de 6,214 m³/seg.

El principal Río es el Grijalva y como secundario el Río Hondo, Santo Domingo y algunos afluentes como el Río Sabinal, que corresponde a la descarga de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La mayoría de los afluentes son intermitentes, presentando aportes únicamente durante la época de lluvias.

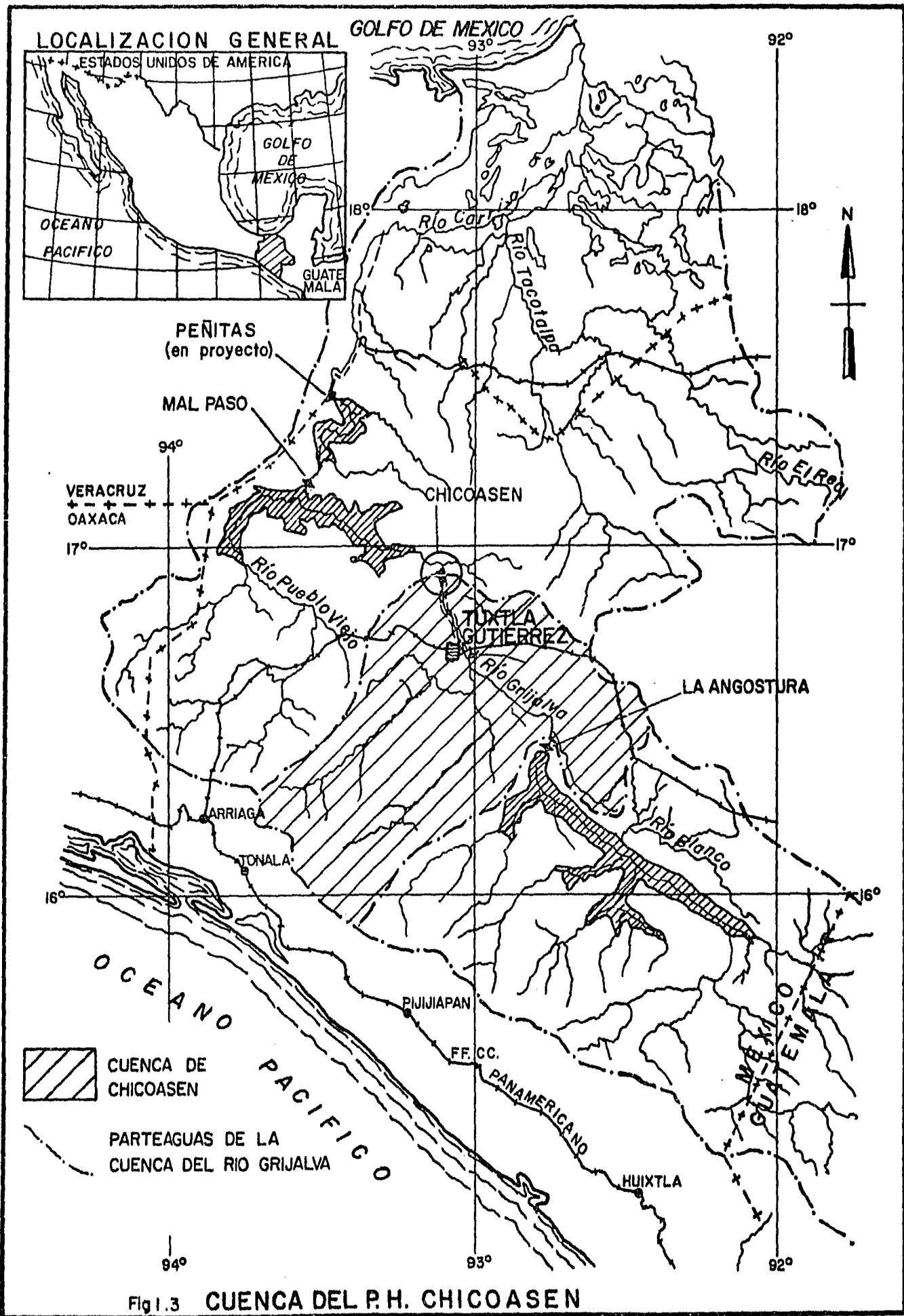


Fig 1.3 CUENCA DEL P.H. CHICOASEN

I.5 DESCRIPCION DE LAS OBRAS

DESVIOS Y ATAGUIAS

Para poder iniciar la construcción de la cortina hubo que hacer algunas obras que aunque momentáneas, fueron necesarias. Entre las que se tienen en primer término a un túnel de predesvío, localizado en margen izquierda, que sirvió para encauzar al río mientras se construía la ataguía con altura de 60 mts. aguas arriba. Al mismo tiempo se construían los dos túneles de desvío, que más tarde servirían como desfogues de casa de máquinas, los cuales tenían 13 m. en sección portal y casi 1,000 m. de longitud.

Con estas dimensiones se daba capacidad para manejar una avenida de 4,500 m³/seg. (El gasto medio anual de la cuenca es de 380 m³/seg.). Ambos desvíos se ubicaron en la margen derecha.

Una vez que el agua del Río Grijalva hubo circulado por los desvíos se procedió a construir la ataguía de aguas-abajo, quedando el lecho del río listo para iniciar el desplante de la cortina.

CORTINA

La cortina es del tipo de materiales graduados, tiene una altura de 265 m. En su sección máxima consta de un núcleo central impermeable de 95 m. de ancho en la base y 15 m. en la corona, protegido por filtros de 7.5 m. de espesor promedio y zonas de transición bastante amplias (fig.1.4). La cota de la corona es de 405 m. s.n.m; la longitud en el desplante es de 1000 m. aproximadamente.

Los respaldos de protección están formados por masas de enrocamiento obtenidas de las excavaciones de la obra de-

toma y de los vertedores, así como material proveniente de las canteras. El volúmen total de materiales usados es de 15×10^6 m³. de los cuales el corazón constituye el 16%.

DIQUE

En margen derecha se encontró un antiguo cauce del río, esto obligó a la construcción de un dique de 55 m. de altura, el cual prolonga la cortina principal hacia la margen derecha. (fig. 1.4)

VERTEDOR

La estructura de la obra de excedencias está formada por un canal de llamada y tres túneles revestidos con sección circular de 17 m. de diámetro y 1,200 m. de longitud, localizados sobre margen izquierda (fig.1.4). La cota de la cresta es 373 m. s.n.m.

Estos túneles terminan en el escarpe de la falla Chi coasén-Malpasso y descargan directamente al Río Grijalva. El gasto de cada túnel está controlado mediante tres compuertas radiales de 8 X 19 m. La obra fue construída para manejar una avenida de diseño de 17,000 m³/seg.

CASA DE MAQUINAS

El equipo de generación se instaló en una cámara subterránea excavada en margen derecha (fig.1.4), consta de 8 turbinas tipo Francis de 300 MW con una carga bruta de 189 m., que se comunican con la obra de toma construída en un canal de llamada lateral a través de tuberías de presión independientes, y descargan, después de pasar por la fosa de oscilación, a los túneles de desfogue; los cuales se usaron como desvío del río durante la construcción.

GALERIAS

Por seguridad de la obra, se construyó una pantalla de impermeabilización, a través de 9 galerías, cuatro en margen izquierda, cuatro en derecha y una bajo el río (fig.1.5)

Desde esta galerías, se realizaron los tratamientos de impermeabilización y reforzamiento del tapete de consolidación, posteriormente se realizaron los drenes mediante barrenos. Durante la operación, estas galerías además de drenar servirían para inspeccionar y obtener datos de la instrumentación de la cortina.

DESAGUE INTERMEDIO

Mediante un túnel revestido de 6 m. de diámetro excavado en margen derecha, con cota del umbral de entrada a la elevación 313 y capacidad de 500 m³/seg., se pretendió controlar el primer llenado del embalse y mantener su nivel a la elevación 320, aproximadamente, durante un tiempo que permitiera observar el comportamiento de la cortina, incluyendo el efecto de llenado sobre la sismicidad local.

En la Tabla I.1 se muestran los datos técnicos mas importantes, referentes a cada parte de la obra.

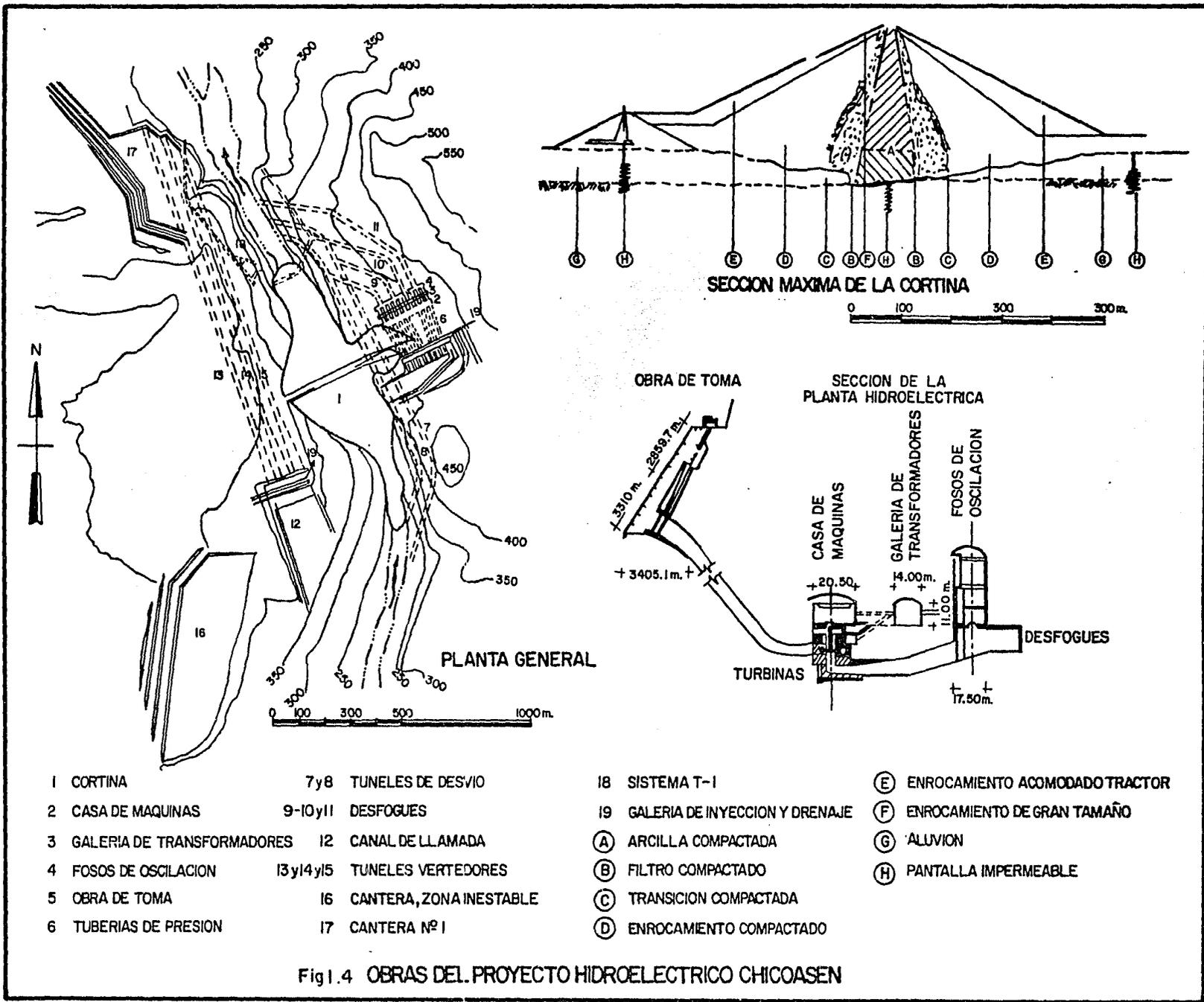


Fig1.4 OBRAS DEL PROYECTO HIDROELECTRICO CHICOASEN

T A B L A I . I

RESUMEN DATOS TECNICOS

H I D R O L O G I A

Area de la cuenca	26030 Km.2
Escurrimiento medio anual	11883 X 10 ⁶ m3
Gasto medio anual	377 m3/seg.
Avenida máxima registrada	6214 m3/seg.
Avenida máxima probable	17000 m3/seg.

E M B A L S E

Capacidad al NAME	1680 X 10 ⁶ m3
Capacidad útil	280 X 10 ⁶ m3
Area inundada al NAME	3000 Ha.

cota	NAME	395 m.s.n.m.
	NAMO	392 m.s.n.m.
	NAMINO	380 m.s.n.m.

C O R T I N A

Tipo	Materiales graduados
Altura máxima	265 m.
Bordo libre	10 m.
Cota corona	405 m.s.n.m.
Ancho corona	20 m.
Longitud corona	584 m.
Volúmen total de material	15X10 ⁶ m3
Vol. Arcilla	2.5X10 ⁶ m3
Vol. Filtro	.73X10 ⁶ m3
Vol. Transición	2.71X10 ⁶ m3
Vol. enrocamiento	9X10 ⁶ m3

VERTEDOR

Longitud total de la cresta	75	m
Elevación de la cresta	373	m.s.n.m.
Avenida de diseño	17000	m ³ /seg.

O B R A D E T O M A

Gasto de diseño	1512	m ³ /seg.
-----------------	------	----------------------

C A S A D E M A Q U I N A S

Número de turbinas	8	
Tipo	Francis	
Carga Neta	189	m.
Gasto de diseño	180	m ³ /seg.
Potencia	416000	CV
Capacidad instalada	2400	NW
Generación media anual	5580	GWII
Factor de planta	.30	

CAPITULO II GEOLOGIA GENERAL DEL EMBALSE

El embalse de la presa Chicoasén, abarca en su totalidad los cañones del Sumidero y Chicoasén, debido a ésto, -- dicho embalse se presenta en forma alargada, únicamente con -- dos tramos amplios que corresponden a la confluencia de la -- cañada Muñiz y el Río Grijalva, asi como la intersección de -- este río con el Río Hondo (fig.2.1)

La parte alargada del embalse corresponde propiamente al cañón del Sumidero, el cual está labrado en el flanco -- de un anticlinal que buza hacia el norte. La parte amplia, -- corresponde a una zona de pliegues y fallas, a través de las -- cuales se labró el cauce del Río Grijalva.

Al final del embalse, se encuentra el Cañón de Chicoasén, ubicado sobre el flanco norte del anticlinal de Chicoasén y cortado por la falla regional Chicoasén-Malpasso --- (fig. 2.5)

Las rocas que afloran en la región del embalse son, en su totalidad, sedimentarias; las cuáles varían de calcáreas a arcillosas y en menor proporción, las rocas clásticas.

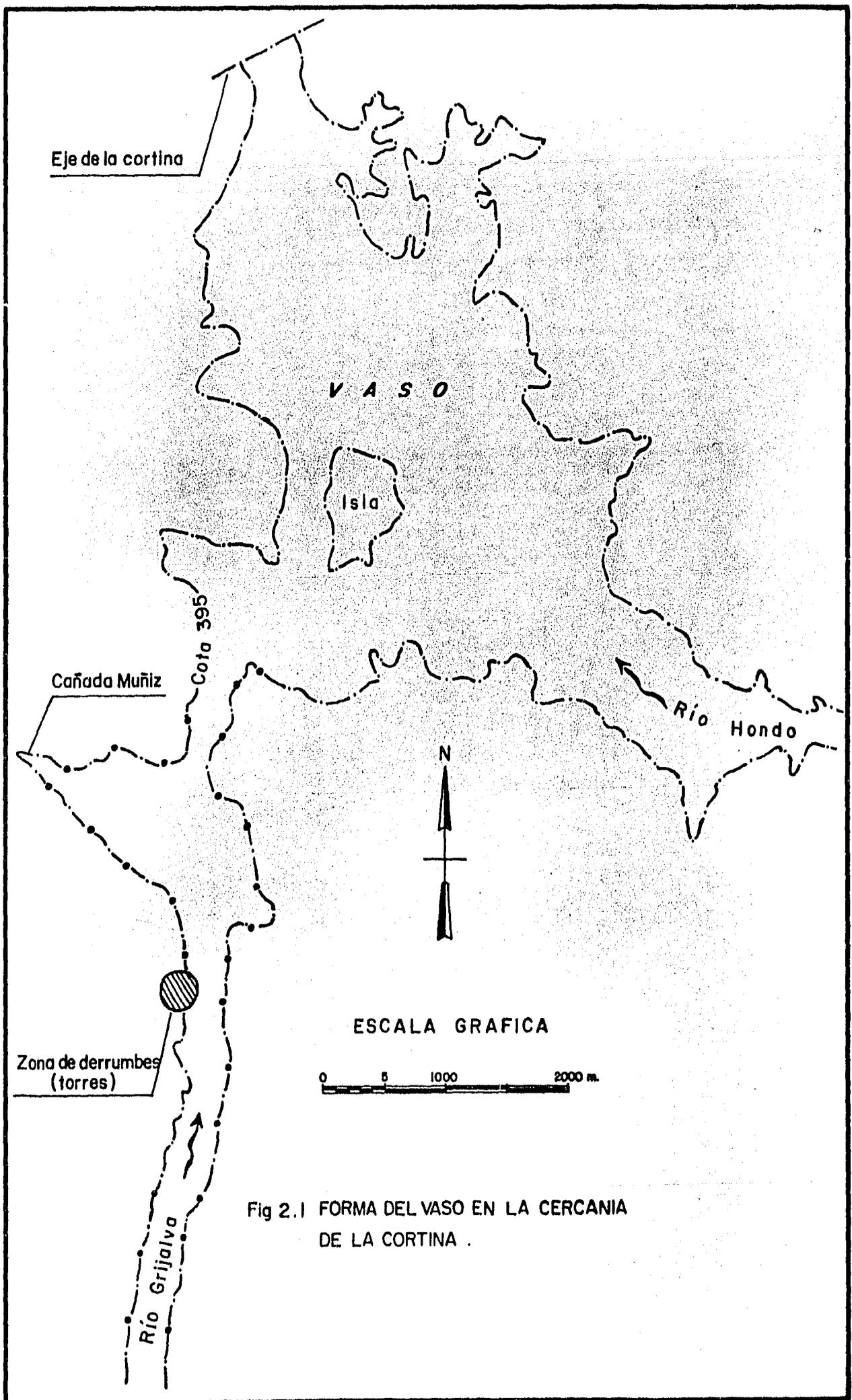


Fig 2.1 FORMA DEL VASO EN LA CERCANIA DE LA CORTINA .

La secuencia estratigráfica abarca edades del Cretácico al Reciente.

II.1 TRABAJOS PREVIOS

Durante el año de 1954, la Secretaría de Recursos --- Hidráulicos, realizó estudios preliminares para la construcción de una presa. En 1963, la Comisión Federal de Electricidad inició los estudios y exploraciones preliminares que definieron al lugar como un proyecto atractivo para una planta hidroeléctrica (C. García, 1964). Para 1969 se consideraban tres alternativas:

- 1.- Una presa alta en el Cañón de Chicoasén (actual)
- 2.- Una presa derivadora al inicio del Cañón del Sumidero con un túnel hasta la salida del propio -- Cañón del Sumidero.
- 3.- La misma Presa Derivadora (alternativa 2) con un túnel a la mitad del Cañón del Sumidero. Además - otra presa de 60 m. de altura en Copainala, (parte final del embalse de la Presa Malpaso).

Con el propósito de definir la alternativa más via--- ble, se efectuaron de 1969 a 1972, estudios de geología regional en una área de 15,000 Km² y de geología de detalle en las zonas del embalse y la boquilla (C. García, Zavala M., - 1973). Las tres alternativas se estudiaron mediante sondcos- y obras subterráneas. De los estudios y evaluaciones económi- cas, se concluyó que la opción más favorable era la primera.

Entre 1972 y 1975 se estudió a detalle la geología en la zona de la boquilla, en el Cañón de Chicoasén, - - - - -

PERIODO	EPOCA		UNIDADES
CUATERNARIO	PLEISTOCENO RECIENTE		Aluvión
	PLIOCENO		Areniscas
TERCEARIO	MIOCENO		Calcarenitas
	OLIGOCENO		Lutitas
	EOCENO		Formación Capoyo
	PALEOCENO		Formación El Bosque
			Lutita Soyotó
			Grupo Ocozocuautla
CRETACICO	SUPERIOR		Caliza Angostura
	INFERIOR		Caliza Sierra Madre

Fig 2.3 COLUMNA ESTATIGRAFICA DEL AREA
(PEMEX 1971)

pequeños horizontes delgados de lutita gris oscura, así como otros pocos de arenisca. El espesor aproximado es de 2400 m. y se estima de edad Albiano.

CRETACICO SUPERIOR

Las rocas del Cretácico Superior, en el área de interés, se pueden dividir en las facies clástica y carbonatada, representadas por el grupo Ocozocuatla y la Caliza Angostura respectivamente. Es conveniente aclarar que en la zona de trabajo solamente aflora la Caliza Angostura, sin embargo se menciona el grupo Ocozocuatla para posibles correlaciones.

GRUPO OCOZOCUAUTLA.-El Grupo Ocozocuatla (Frost-Langenheim, 1974) descansa sobre la caliza Sierra Madre en una aparente concordancia. Sin embargo, existen estudios paleontológicos que indican un hiatus debido a la ausencia de depósitos durante el Coniaciano y Santoniano. El Grupo Ocozocuatla fué dividido en cinco formaciones por Frost y Langenheim (1974).

CALIZA ANGOSTURA:-La caliza Angostura es correlacionable con el Grupo Ocozocuatla (Zavala-Moreno 1971, Pemex) en su facies carbonatada. Está constituida básicamente por caliza y dolomía de color gris claro, con estratificación de masiva a media. Cabe hacer notar que esta formación es la que aflora en la boquilla del proyecto Chicoasén, y se tratará con mas detalle en el siguiente capítulo. El espesor estimado está entre 400 y 600 m. asignándole edad Campaniano-Mastrichtiano.

TERCIARIO INFERIOR

LUTITA SOYALO.- La lutita Soyalo (Frost y Langenheim 1974) descansa concordantemente sobre las formaciones del -- Cretácico Superior. Consiste en su parte inferior por lutita negra verdosa, presentando interestratificación de arenisca de grano grueso y caliza arenosa. La parte media está constituida por arenisca mal cementada y lutitas verde oscuro, en la parte superior está constituida por arenisca con matriz arcillo-calcárea color verde oscuro. Presentándose con un espesor aproximado de 900 m., asignándole edad Cretácico Superior-Paleoceno.

FORMACION EL BOSQUE.-La formación El Bosque (Frost y Langenheim 1974) se presenta sobre la Lutita Soyalo en forma discordante, incluso en algunas regiones del área está ausente.

Está constituida por depósitos continentales principalmente, y alguna pequeña parte de origen marino. La parte continental la forman el conglomerado, arenisca rojiza y lutita color morado oscuro; la parte marina la forman los esca sos lentes calcáreos. Esta formación presenta un espesor de 700 m. y edad aproximada Eoceno Inferior.

FORMACION CAPOYA.-La formación Capoya (Licari 1960, Allison 1967, Frost y Langenheim 1974) se presenta sobre la formación El Bosque de forma discordante y consiste de arenisca y lutita muy delesnables, interestratificada con conglomerado polimíctico delesnable también. Se asignó edad --- Eoceno Medio a esta formación y un espesor aproximado de 300 m.

TERCIARIO SUPERIOR

Los depósitos del Terciario Superior que descansan concordantemente sobre la formación Capoya fueron divididos en tres partes, de acuerdo a sus características litológicas.

La parte inferior está constituida por lutitas rojizas, la parte media está constituida por calizas biógenas y coquinoideas color gris oscuro, de estratificación delgada; la parte superior está constituida por arenisca con pequeños lentes de caliza y conglomerados color pardo oscuro.

CUATERNARIO

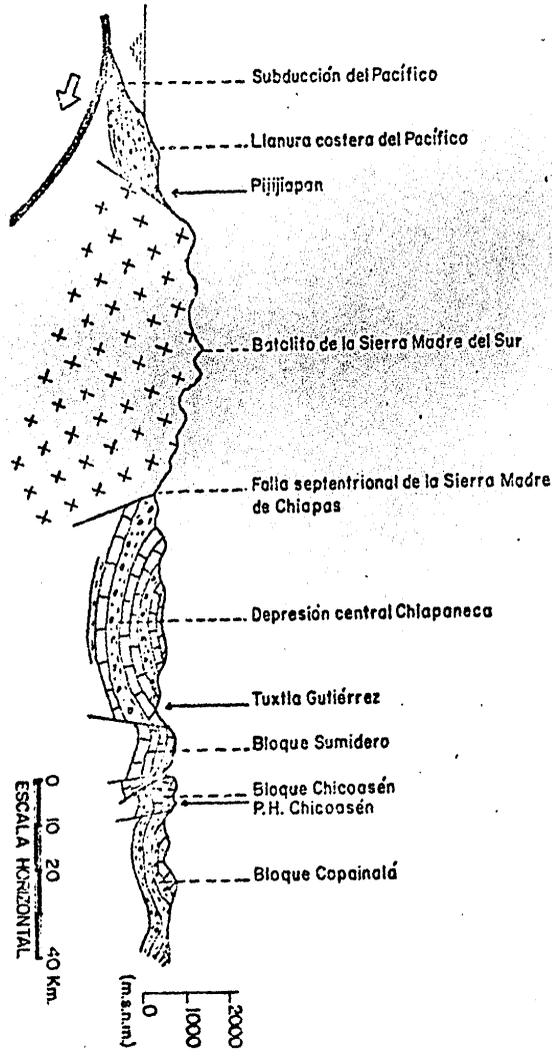
El Cuaternario está representado por depósitos de pie de monte, terrazas aluviales, areniscas e incluso algunos horizontes esporádicos de tobas.

II.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Las estructuras geológicas en el sitio de Chicoasón son el resultado de la intensa actividad tectónica que caracteriza a la región. Debido a esos eventos se generaron pliegues cortados en su mayoría por fallas y familias de juntas. El rumbo de los ejes de los pliegues (NE-SW) así como el de las fallas, da idea de la dirección del empuje, asimismo, la complejidad de las estructuras geológicas sugiere la magnitud de los esfuerzos actuantes, como se mencionó en el capítulo anterior en geomorfología.

La región está seccionada en cinco grandes bloques, en los cuales se ubican los pliegues (fig. 2.4). Cada bloque está definido por un par de fallas.

Fig 2.4 SECCION ESTRUCTURAL ESQUEMATICA



De sur a norte los bloques se pueden denominar como:

BATOLITO DE LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS
DEPRESION CENTRAL DE CHIAPAS
MONOCLINAL SUMIDERO
SINCLINAL OSUMACINTA Y ANTICLINAL CHICOASEN
SINCLINAL BOMBANA Y ANTICLINAL COPAINALA

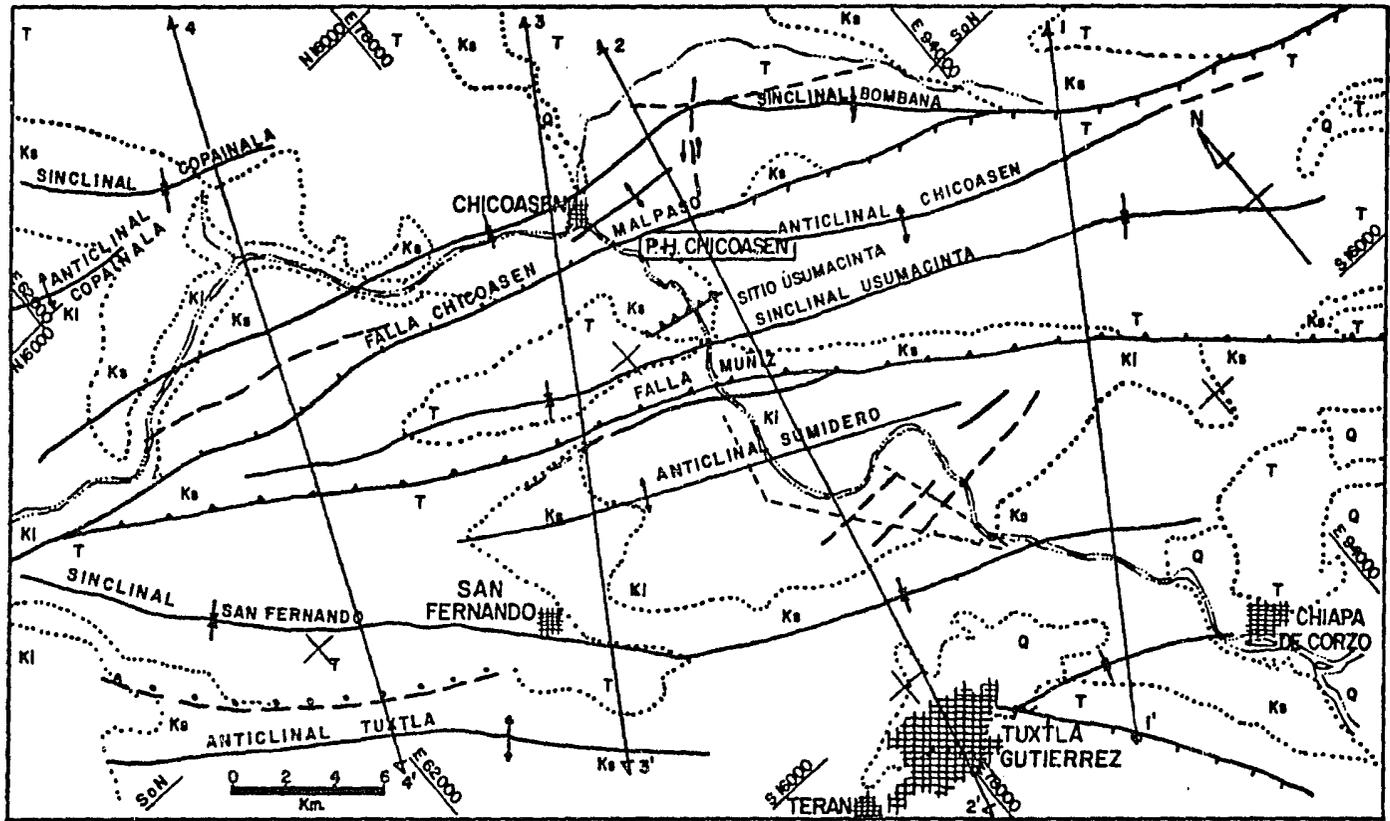
Las fallas que limitan estos bloques son:

FALLA DE LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS
FALLA CHIAPA DE CORZO
FALLA MUÑIZ
FALLA CHICOASEN-MALPASO

La zona en cuestión se ubica dentro de los bloques - Chicosén y Sumidero en donde las relaciones tectónicas son - notablemente distintas a las de la zona de costa del Estado de Chiapas. En dichos bloques, se observan un sinúmero de -- pliegues cortados por fallas, existiendo además familias de -- juntas que propician la orientación del cauce del río.

El plano geológico general (fig.2.5) muestra de forma objetiva las principales estructuras geológicas del área en estudio, pudiéndose definir como de mayor importancia las -- que a continuación se mencionan:

- ANTICLINAL SUMIDERO
- SINCLINAL OSUMACINTA
- ANTICLINAL CHICOASEN
- SINCLINAL BOMBANA
- ANTICLINAL COPAINALA
- FALLA MUÑIZ
- FALLA CHICOASEN-MALPASO



SIMBOLOGIA

- Q CUATERNARIO
- T TERCIARIO
- Ks CRETACICO SUPERIOR
- Kl CRETACICO INFERIOR
- Contacto geológico
- Anticlinal
- Sinclinal
- Falla normal
- Falla inversa
- Falla o fractura
- Línea de sección

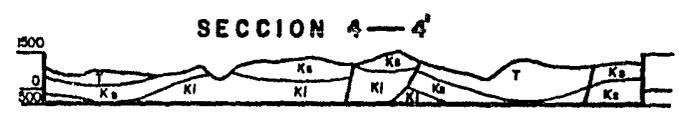
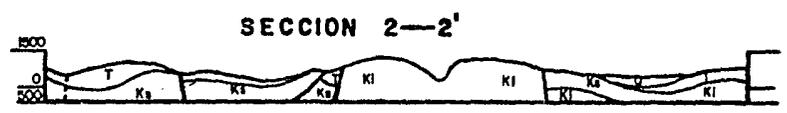
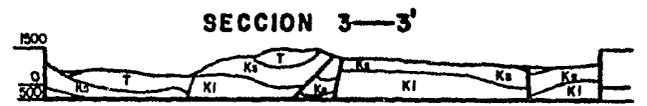
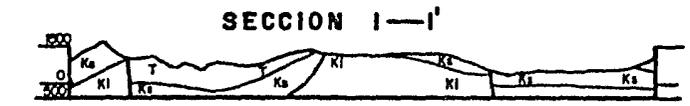


Fig 2.5 PLANO GEOLOGICO GENERAL

CAPITULO III GEOTECNIA EN EL SITIO DE LA OBRA

El sitio de la obra, abarca al cañón de Chicoasén y las áreas adyacentes, desde 25 km. aguas arriba, hasta 1 Km. aguas abajo del eje de la cortina. La boquilla de la presa está constituida por un cañón estrecho con cantiles verticales, labrados por el río sobre roca caliza.

Dentro del área existen dos fallas importantes, la Falla Muñoz y la Falla Chicoasén-Malpasso, a 5 Km. aguas arriba y a 1 km. aguas abajo del eje de la cortina respectivamente, ambas con extensión regional.

Se identificaron tres unidades litológicas, constituidas por caliza del Cretácico, cubiertas por lutita del Terciario. La zona está afectada por tres familias de fracturas subverticales, una de ellas paralela al río. La sismicidad en esta región es alta (Esteva, 1970).

III.1 ESTUDIOS PREVIOS

Para conocer las condiciones geológicas y las características geotécnicas que afectan a la obra, se llevaron a

CAPITULO III GEOTECNIA EN EL SITIO DE LA OBRA

El sitio de la obra, abarca al cañón de Chicoasén y las áreas adyacentes, desde 25 km. aguas arriba, hasta 1 Km. aguas abajo del eje de la cortina. La boquilla de la presa - está constituida por un cañón estrecho con cantiles verticales, labrados por el río sobre roca caliza.

Dentro del área existen dos fallas importantes, la Falla Muñoz y la Falla Chicoasén-Malpaso, a 5 Km. aguas arriba y a 1 km. aguas abajo del eje de la cortina respectivamente, ambas con extensión regional.

Se identificaron tres unidades litológicas, constituidas por caliza del Cretácico, cubiertas por lutita del Terciario. La zona está afectada por tres familias de fracturas subverticales, una de ellas paralela al río. La sismicidad en esta región es alta (Esteva, 1970).

III.1 ESTUDIOS PREVIOS

Para conocer las condiciones geológicas y las características geotécnicas que afectan a la obra, se llevaron a

cabo obras subterráneas, barrenos, pruebas de mecánica de rocas y geofísica. Al mismo tiempo, se empezaron los proyectos para una presa de materiales graduados y otra de arco.

En el transcurso de los estudios se definió con mayor precisión la zona inestable en margen izquierda, las unidades litológicas presentes y las familias de facturas que afectan a la zona, así como las relaciones con las fallas regionales y su probable influencia en la obra proyectada. Estos trabajos se realizaron en todo el cañón y con particular énfasis en la boquilla.

Se abrieron socavones y se perforaron sondeos con recuperación en los tres ejes posibles de la cortina.

Se efectuaron pruebas de permeabilidad en los sondeos y de mecánica de rocas en los socavones.

Se tomó la decisión de construir una presa de materiales graduados, tomando como parámetros de juicio los costos, condiciones geológicas, riesgo sísmico y experiencias previas en México, mismos que fueron mas favorables que para la opción de una presa de arco de doble curvatura.

III.2 SECUENCIA LITOLÓGICA GEOTÉCNICA

Las rocas que afloran en el área de la obra, son sedimentarias de la caliza Angostura, definida en el capítulo anterior, también afloran rocas del Terciario (lutitas, areniscas y brechas) aunque en mucho menor cantidad.

Con fines geotécnicos, fué conveniente dividir a la Caliza Angostura en tres unidades litológicas. La división se hizo a partir de la litología, estratigrafía y -----

propiedades mecánicas.

Los depósitos Terciarios se tratan de forma general en este tema, ya que por su volumen y por su posición no constituyen una unidad importante que afecte al desarrollo y funcionamiento de la presa. Sin embargo, esta unidad tiene posibilidades de utilización como banco de material. Algunas de las propiedades mecánicas de cada unidad, fueron determinadas por métodos indirectos en campo, otras fueron definidas en laboratorio; para la subdivisión de la caliza Angostura se siguieron dos criterios, uno en base a la resistencia a la compresión y al módulo de elasticidad, de acuerdo a la clasificación ingenieril de rocas intactas (A.U. Deere R.P. Miller, 1966) (fig.3.1) y otro acorde a la recuperación y al tamaño de los fragmentos obtenidos en los sondeos, usando el criterio de RQD (Deere 1963)

UNIDAD UNO (U1).- Constituída por caliza color crema con estratificación de delgada a gruesa (40 a 100 cm), interestratificada con delgadas capas (1 a 10 cm) de arcilla negra de alta plasticidad.

Esta unidad presenta alteración debido al fracturamiento, disolución e intemperismo; dadas las condiciones de la roca, se asume una alterabilidad considerable aunque no riesgosa a corto plazo, el espesor aproximado es de 140 m. y representa la parte superior de la secuencia. (Zavala M. 1973). Los resultados de los análisis mecánicos y físicos se muestran a continuación:

PROPIEDADES
MECANICAS

Resistencia a la compresión: 600 Kg/cm²
Módulo de cortante: 1.04×10^5 kg/cm²
Módulo de elasticidad: 2.5×10^5 Kg/cm²
Relación de Poisson: .25

CLASIFICACION: { Rocas Intactas: CM -CL
RQD : EXCELENTE

UNIDAD DOS (U2).- Constituída por caliza color blanco de estratificación masiva y textura arenosa. Esta unidad es la que presenta menos alteración, asi como poco fracturamiento que la afecta en menor escala que la anterior, lo que disminuye su alterabilidad. La Unidad subyace concordantemente con U1 y representa la parte media de la secuencia. Se presenta con un espesor de 120 m. (Zavala M.,1973). Los resultados de los análisis se muestran a continuación.

PROPIEDADES MECANICAS { Resistencia a la compresión: 750 a 800 kg/cm2
Módulo de cortante 1.4x10⁵ Kg/cm2
Módulo de elasticidad: 3.5x10⁵ Kg/cm2
Relación de Poissón: .25

CLASIFICACION: { Rocas Intactas: CII-CM
RQD : EXCELENTE

UNIDAD TRES (U3).- La Unidad Tres constituída por caliza gris oscuro en estratificación de delgada a gruesa (Payne,1972) con algunos lentes delgados de arcilla carbonosa negra interestratificada. Esta Unidad se encuentra en la parte inferior de la secuencia; aflora únicamente en el cauce del Río Grijalva, con espesor aproximado de 70 m. (Zavala M.,1973)

Esta caliza presenta fuerte alteración e intenso fracturamiento en el lecho del río, fuera del cauce la roca se presenta sana, no existen evidencias de disolución. Dentro de esta Unidad se alojan muy pocas obras civiles. Algunas características mecánicas asi como su clasificación se--

muestra a continuación:

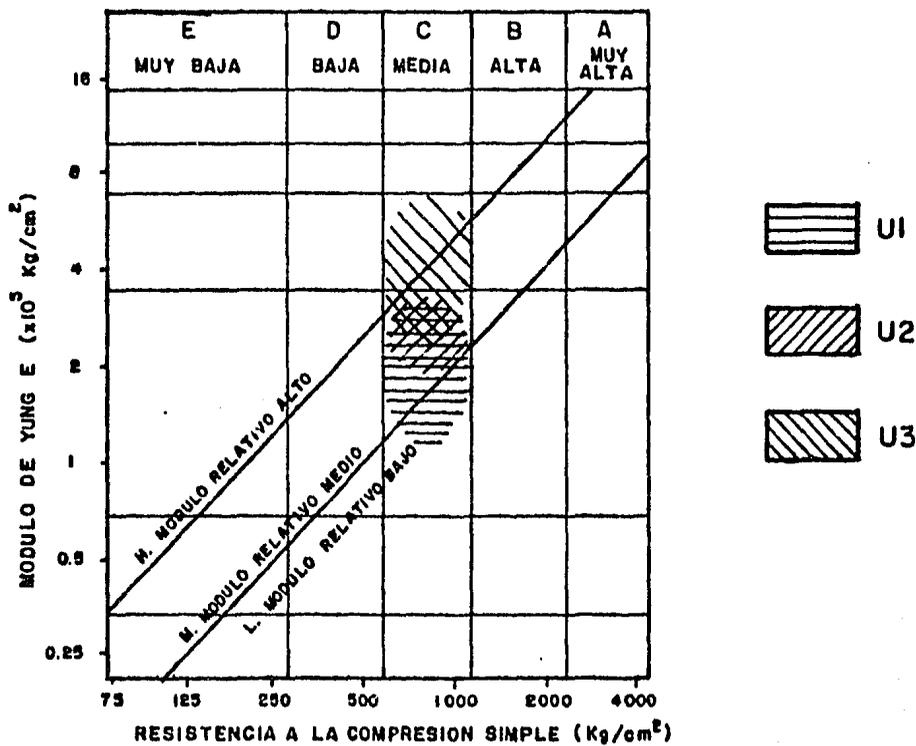
PROPIEDADES
MECANICAS

Resistencia a la compresión 650 Kg/cm²
 Módulo de cortante: 1.6×10^5 Kg/cm²
 Módulo de elasticidad: 4×10^5 Kg/cm²
 Relación de Poisson: .25

CLASIFICACION

Rocas Intactas: CH-CM
 RQD : EXCELENTE

A continuación se presenta un esquema de la clasificación ingenieril de las rocas intactas (Deer y Miller 1966) en la que se ubican de forma gráfica las rocas de las unidades calcáreas antes mencionadas. (Fig.3.1)



(fig.3.1) Clasificación Ingenieril de rocas intactas (Deer Miller, 1966).

Las clasificaciones hechas no son válidas para muestras de roca obtenidas en el cauce o las laderas del cañón, ya que en esa zona la roca es de muy baja calidad.

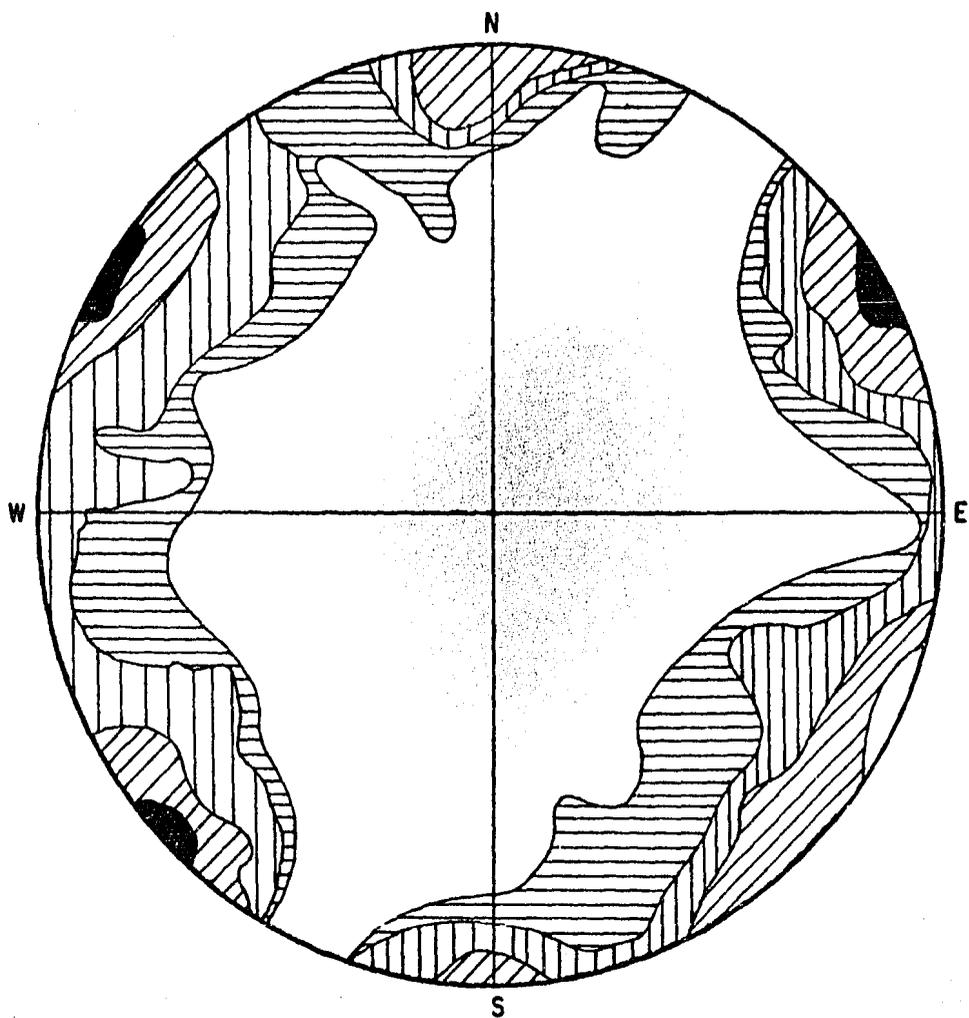
III.3 DISCONTINUIDADES

En el área de la obra, ambas márgenes y el cauce se presentan afectadas por una infinidad de fallas y fracturas (discontinuidades), orientadas en tres direcciones preferentes (fig.3.2). Lo anterior se explica, ya que al actuar los empujes (esfuerzos tectónicos), la roca los absorbió deformándose hasta un punto crítico que una vez rebasado dió lugar a la falla Chicoasén-Malpaso. La dirección de la falla es función de la dirección de los esfuerzos y de propiedades mecánicas de la roca (Mohr-Coulomb, 1928). Después de la falla, el estado de esfuerzos se modifica, explicando así la generación de tres familias de discontinuidades de segundo orden a diversos ángulos con respecto a la falla principal (Price, 1966). Debido a la orientación de cada familia de fracturas el terreno quedó dividido en bloques.

De acuerdo al rumbo de las fracturas, éstas se agrupan en tres familias, que son: Alpha, Beta y Gamma, cuyas características se describen a continuación.

ALPHA.- Estas discontinuidades, no obstante ser alabeadas tanto en sentido vertical como horizontal, presentan un rumbo general (NE-SW) con echado al SE que varía de 70° a vertical.

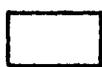
En algunos casos es posible observar desplazamientos verticales relativos, de 3 a 50 m., en las diferentes unidades litológicas. Esta familia es la que presenta mayor densidad e importancia en el área, afectando severamente a-



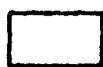
0-2%



2-4 %



4-8 %



8-10 %



>12%

Fig 3.2 DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE
FRACTURAS

la unidad litológica UI en la cual, al lado de las fallas, se presenta una zona de fracturamiento de menor escala, no así en la U2 ya que aquí se presentan como planos limpios y sin fracturamiento adyacente; lo anterior se puede atribuir al carácter masivo de la roca. La frecuencia con que ocurren varía entre 100 y 200 m. así mismo la longitud de estas discontinuidades es variable, pudiendo notar que atraviesan a la zona de estudio.

BETA.- Es la familia con menor densidad. El rumbo general E-W forma un ángulo aproximado de 60° con el rumbo de la familia ALPHA, el echado es prácticamente vertical.

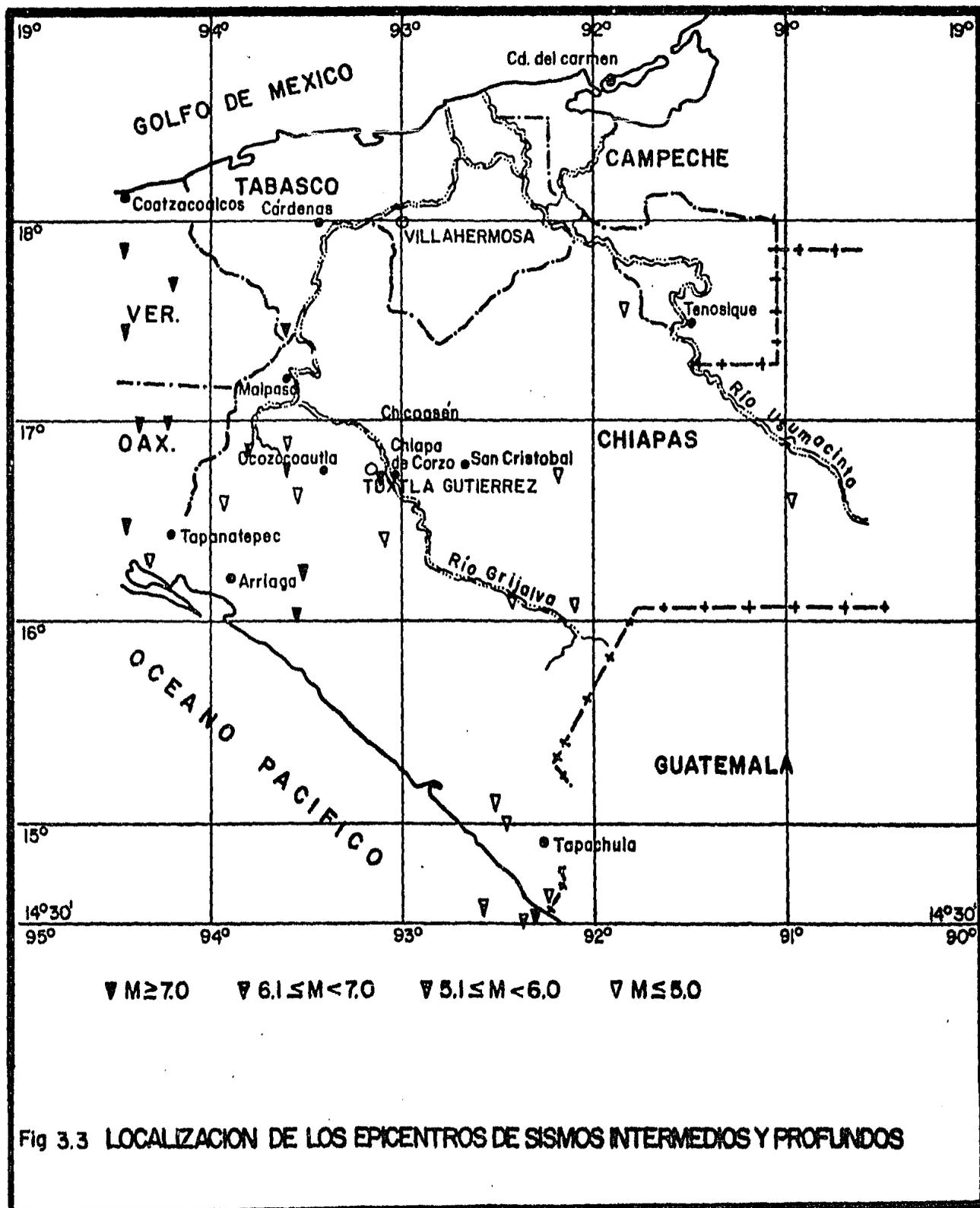
Los relieves, presentan forma alabeada con estrías que indican movimientos relativos en sentido vertical y horizontal. Los efectos de estas fallas y fracturas sobre las unidades litológicas son similares a las de la familia ALPHA.

GAMMA.- Esta familia ocupa, por su abundancia e importancia, el segundo lugar. Las fracturas presentan relieves alabeados con rumbo general NW-SE y echado vertical. A través de esta familia se efectuó el labrado del cañón de Chicoasén, y ambos efectos causaron la decompresión de las laderas.

Con la obtención y representación de los datos de discontinuidades, se pudieron programar las pruebas de campo que permitieron inferir los mecanismos de desplazamiento de la margen izquierda, así como diseñar un esquema eficiente de inyecciones y anclajes.

III.4 ESTRUCTURAS LOCALES

El área en la que se encuentra comprendida la obra-



corresponde al flanco NE del Anticlinal Chicoasén, truncado al Norte por la falla Chicoasén-Malpaso (Plano 1). Dicho -- flanco está afectado por una segunda etapa de empuje gene--rándose pliegues menores. Esto aunado a tres sistemas de -- fracturas, da como resultado la presencia bloques indepen--dientes. Hacia la Zona de la falla Chicoasén-Malpaso, la roca presenta echados más intensos, así como un fracturamiento más cerrado que propicia el resquebrajamiento de la roca UI.

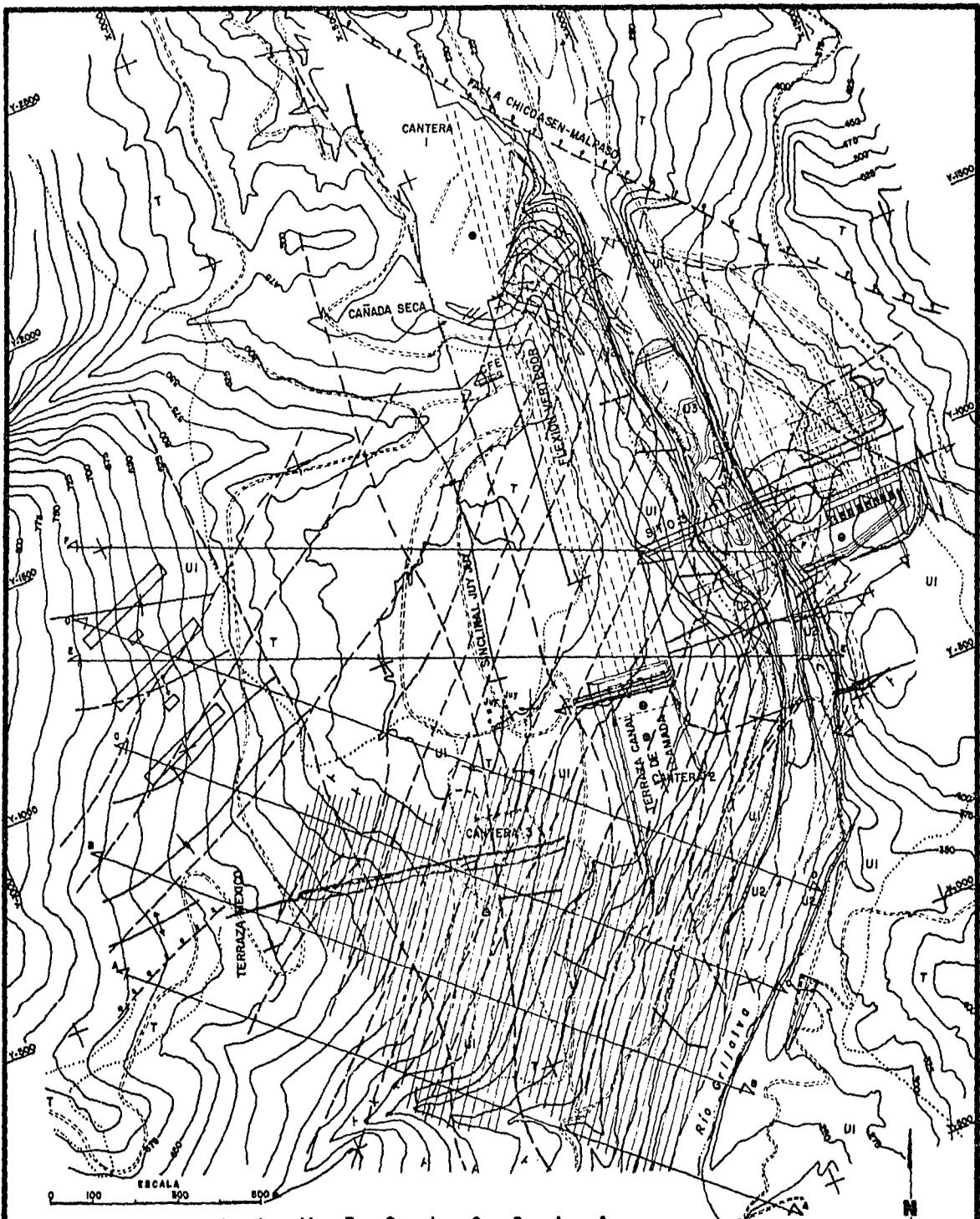
La conjunción de los factores mencionados da como -- resultado la existencia de zonas de estabilidad crítica, co--mo la márgen izquierda que será analizada en el siguiente -- capítulo.

En la margen derecha se tienen echados mas pronun--ciados que en margen izquierda, sin embargo, ésto no repre--senta riesgos de estabilidad debido a su posición, la pared poniente de casa de Máquinas se consideró inestable, por es--to fué densamente anclada.

Existe una infinidad de pequeños pliegues mostrados en el plano geológico del sitio de la obra, sin embargo, a--continuación se mencionan sólo los que tienen alguna impor--tancia geotécnica.

ANTICLINAL JUY JUY
SINCLINAL JUY JUY
FLEXION DEL CAUCE DEL RIO
FLEXION DEL VERTEDOR
TERRAZA MEXICO
TERRAZA CANAL DE LLAMADA

Es perteneciente aclarar que en este capítulo se ha-



S I M B O L O G I A

- Campamento
- Camino
- Excavación subterránea
- Excavación a cielo abierto
- Galería de inyección y drenaje
- Curva de nivel
- Zona inestable
- Líneas de sección
- Excavación terminada
- Excavación en proceso

- Faja
- Fractura
- Sinclinal
- Anticlinal
- Contacto geológico
- Rumbo e inclinación
- Bocavón para exploración geológica
- Bonda para exploración geológica

- CUATERNARIO Aluvión
- TERCARIO Lutita arenosa
- Unidad I: Caliza interestratificada con lutita
- CRETACICO SUPERIOR Unidad 2: Caliza masiva
- Unidad 3: Caliza interestratificada con lutita

TESIS PROFESIONAL
RAUL F. VERDUZCO MURILLO

PLANO GEOLOGICO
DEL SITIO DE LA OBRA

PLANO I AGOSTO 84

denominado flexión a un cambio significativo en la magnitud del echado en una distancia relativamente corta.

III.5 PERMEABILIDAD E INYECCIONES

Dadas las condiciones del macizo rocoso, la permeabilidad en la zona de la boquilla, fue evaluada mediante pruebas de agua tipo Lugeon. Estas pruebas fueron realizadas, en principio, siguiendo criterios geotécnicos, después de forma sistemática.

Así, mediante cálculos estadísticos apoyados en evidencias geológicas se logró, en forma muy general, llegar a las siguientes conclusiones:

- 1.-La permeabilidad en margen derecha es mayor que en margen izquierda, debido a que la unidad litológica UI se profundiza.
- 2.-La permeabilidad de la roca es causada por la fisuración, planos de estratificación y zonas de disolución.
- 3.-El coeficiente de permeabilidad en las laderas varía de 20 a 60 unidades Lugeon (UL) clasificando al macizo rocoso como permeable a altamente permeable, debido seguramente a la decompresión causada por la erosión del río.
- 4.-El coeficiente de permeabilidad hasta 20 m. de profundidad, tiene un promedio de 12 UL. (Poco permeable a permeable) y es atribuido a los planos de estratificación de la unidad litológica UI.

5.- La permeabilidad de 20 a 80 m. de profundidad - varía de 2 a 16 UL. (impermeable a permeable) - los valores bajos corresponden a la Unidad Litológica U2 y los altos a la UI. En el caso de la U2, ésta presenta permeabilidad absoluta, ó primaria, muy baja.

6.- La permeabilidad a más de 80 m. de profundidad - difícilmente rebasa las 2 UL (Impermeable) en - roca no fracturada, en las zonas fracturadas no excede las 16 UL (permeable)

Por otra parte, el tratamiento de impermeabilización y consolidación, se efectuó mediante inyección de barrenos a través de 9 galerías (fig. 1.4) y desde la superficie.

La dirección, inclinación y espaciamento de los barrenos se proyectó en base a la dirección e inclinación de las discontinuidades (fallas, fracturas y planos de estratificación) a modo de incidir con mayor frecuencia en ellas.

El material usado para impermeabilizar fue mezclas agua-cemento en relación variable (1/6 a 1/1) estabilizadas con bentonita. Para el tratamiento de consolidación se usaron mezclas inestables y algunas veces mortero (agua-cemento-arena).

La impermeabilización se efectuó a través de barrenos ubicados sobre tres ejes con distribución en tresbolillo, inyectándose primeramente los ejes de las orillas y al final el central. De este modo se observaban los consumos y se decidía o no inyectar al eje restante.

La inyección se efectuó en varias etapas (3 a 6) y las presiones fueron aumentando tanto con la etapa como con la profundidad (.5 a 70 kg/cm²).

III.6 RIESGO SISMICO

Debido a la alta sismicidad de la región y ante las evidencias de las fallas Chicoasén-Malpaso y Muñiz, se hizo necesario un estudio detallado mediante el cual se determinaran las aceleraciones máximas del terreno, en el sitio de la obra, ante un sismo.

El estudio fué llevado a cabo por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México, (1975) concluyendo lo siguiente:

El cañón del sumidero se encuentra en una zona de alta sismicidad en donde la mayor parte de la actividad sísmica se ha generado a profundidades de 70 a 100 Km.

Sin embargo, existe información instrumental que atestigua la ocurrencia de temblores superficiales de magnitud moderada a poca distancia del sitio de la obra. (Trigos y Esteva 1975) (fig.3.3). E. Artyuskov, opinó que dadas las características tectónicas de la zona hacen difícil pensar en magnitudes mayores de 6.5 (escala Mercali) en la vecindad del Sumidero, aunque es válido suponer temblores superficiales de magnitud cercana a 8 a lo largo de la costa, a 150 km. del sitio.

En lo relativo a las aceleraciones máximas, las conclusiones conducen a valores de .16 g. para recurrencia de 100 años y .28 g. para recurrencia de 500 años. Las velocidades son de 20 y 32 cm/seg. respectivamente, de acuerdo al --

critterio de L. Esteva (1970) en el que hace intervenir la --
distancia al foco del sismo y la magnitud de los sismos pro-
bables.

El coeficiente sísmico (Cs) es la relación de la ace-
leración del sismo y la de la gravedad. Vale la pena hacer -
notar que .3 g. es un valor no observado en la naturaleza --
(Newmark y Rosemblyeth).

CAPITULO IV ANALISIS DE LA ZONA INESTABLE

La estabilidad de la margen izquierda de la presa -- Chicoasén, ha sido objeto de numerosos estudios geológicos y mecánicos. Durante la exploración geológica en el área, se -- observó que el echado de los estratos buza hacia el río, con ángulos entre 4° y 34° , además se vió que está afectada fuer^{te}mente por fracturas de la familia GAMMA, paralela al río, dando como resultado ambos efectos, una zona potencial de -- deslizamiento durante la operación de la presa.

En un principio se realizaron estudios por el Instituto de Ingeniería de la UNAM que definieron como zona inestable a cualquier lugar en la ladera cuyo echado fuera mayor de 8° ; prácticamente toda la margen izquierda, con volúmen de roca a deslizar de 80×10^6 m³ descartándose el proyecto.

Sin embargo, el estudio adolecía de varias lagunas, -- en particular en relación con la geometría del problema y -- las características de resistencia de los materiales arcillo^{so}s, así mismo al considerar los efectos de los sismos, las -- hipótesis usadas fueron conservadoras en exceso. Ante la --- imposibilidad de encontrar un sitio con el rendimiento econó^{mico}

mico como el de Chicoasén, se realizaron investigaciones -- minuciosas sobre el problema a fin de hallar solución a dicho proyecto.

IV.1 EXPLORACIONES A DETALLE

Con el fin de recabar el mayor número de datos geológico-estructurales, se efectuó un levantamiento detallado mediante secciones topográficas normales al río, a cada 50-m., desde la cota 200 a 1500 m.s.n.m.

De este modo, se logró apegar mas a la realidad el modelo geológico previamente obtenido. Al mismo tiempo se desarrolló un programa de barrenación con recuperación de núcleos, se excavaron varios socavones y una trinchera. Sobre cada sección topográfica se realizaron sondeos geofísicos, tanto de sísmico como de resistividad. En algunos barrenos se efectuaron registros de rayos gamma, con el fin de detectar las capas de arcilla.

El total de barrenos en ese programa fué de 240, -- con una longitud perforada cercana a los 40,000 m.; los socavones fueron nueve, con 2000 m. de desarrollo total; la trinchera con 1000 m. de longitud y 20 m. de profundidad.

Con la información así obtenida, se encontró que la presencia de las lutitas del Terciario, depositada en discordancia, habían oscurecido los datos debajo de éstas, y por tanto el modelo geológico propuesto con anterioridad no era suficiente para un análisis de estabilidad real.

IV.2 FUNDAMENTACION TEORICA Y EXPERIMENTAL

Se realizó un programa de investigación y pruebas de

mecánica de rocas, en campo y laboratorio, conjuntamente -- con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

De acuerdo con los resultados de las pruebas de corte directo (Alberro, 1975), el ángulo de fricción (ϕ) en las intercalaciones arcillosas de la unidad litológica UI varía de 8 a 22° dependiendo del contenido de agua, a esas condiciones presenta falla progresiva.

La observación visual en los socavones y en la trinchera, puso en evidencia ciertos "detalles geológicos menores" tales como el alabeo de las fallas y fracturas y las ondulaciones en el contacto de las unidades litológicas UI/U2.

El único plano potencial de falla lo representa el contacto litológico UI/U2. Las ondulaciones en ese contacto inducen a un efecto estabilizador en el plano de falla.

Esto se justifica si se somete a un espécimen una fuerza normal (N) y otra de corte (S) el cual tenga un plano de falla horizontal predeterminado (fig.4.1). La Ley de resistencia que gobierna tal efecto es la de Mohr-Coulomb.

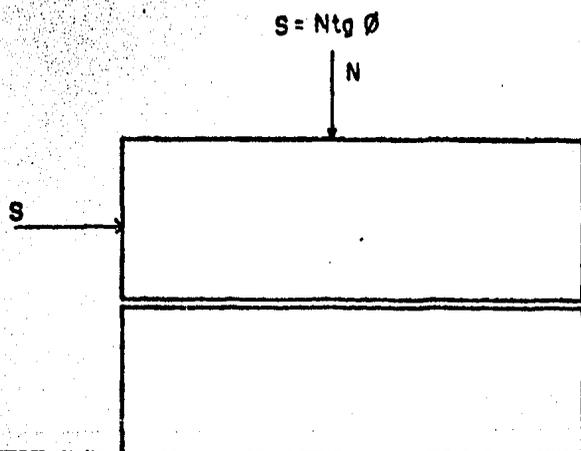


Fig 4.1 Plano de la falla horizontal

Sin embargo, cuando la discontinuidad no es horizontal, se establece el equilibrio sobre dicha discontinuidad. (fig.4.2)

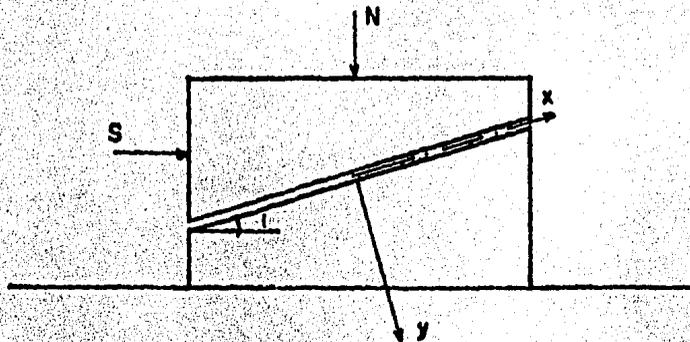


Fig 4.2 Plano de falla inclinado

Realizando suma de fuerzas en ambos ejes:

$$\sum F_x = S \cos i - N \operatorname{sen} i = S'$$

$$\sum F_y = N \cos i + S \operatorname{sen} i = N'$$

y sustituyendo en la ec 4.1 se tiene

$$S' = N' \operatorname{tg} \phi$$

$$S \cos i - N \operatorname{sen} i = (N \cos i + S \operatorname{sen} i) \operatorname{tg} \phi$$

$$S \cos i - N \operatorname{sen} i = N \cos i \operatorname{tg} \phi + S \operatorname{sen} i \operatorname{tg} \phi \quad \text{--- 4.2}$$

agrupando términos semejantes se obtiene el siguiente arreglo:

$$S(\cos i - \operatorname{sen} i \operatorname{tg} \phi) = N(\cos i \operatorname{tg} \phi + \operatorname{sen} i)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{\cos i \operatorname{tg} \phi + \operatorname{sen} i}{\cos i - \operatorname{sen} i \operatorname{tg} \phi} \quad \text{--- 4.3}$$

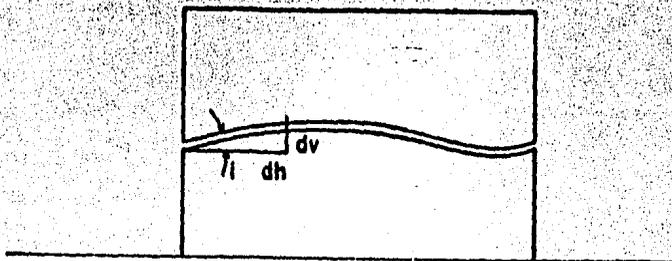
dividiendo la ec. 4.3 por $\cos i$ se tiene:

$$\frac{S}{N} = \frac{\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} i}{1 - \operatorname{tg} i \operatorname{tg} \phi} ; \quad \frac{S}{N} = \operatorname{tg} (\phi + i) \quad \text{--- 4.4}$$

finalmente queda la ec. 4.1 como:

$$S = N \operatorname{tg} (\phi + i) \quad \text{--- 4.5}$$

Para el caso de las ondulaciones (fig. 4.3) se consideró



$$\operatorname{tg} i = \frac{dv}{dh}$$

Fig. 4.3 Plano de falla con ondulaciones

Se observó que en la margen izquierda de Chicoasén, el ángulo i variaba de 0° a 15° .

De este modo se observa que el ángulo de fricción - antes del deslizamiento es $(\phi + i)$, una vez que el deslizamiento da principio, el ángulo de fricción que gobierna, es el residual (ϕ) , el cual es real, entre los labios de la discontinuidad, mientras que el ángulo (i) tiende a cero. Lo anterior implica que el movimiento relativo entre las paredes no sea exclusivamente en la dirección del plano de falla sino - que existe también una componente normal (efecto de dilatación) presentándose así la interacción entre dovelas.

Por lo anterior se justifica el suponer una falla de pico y no gradual como se estimó en un principio con los resultados de laboratorio.

El comportamiento se estima conforme a la figura (fig.4.4)

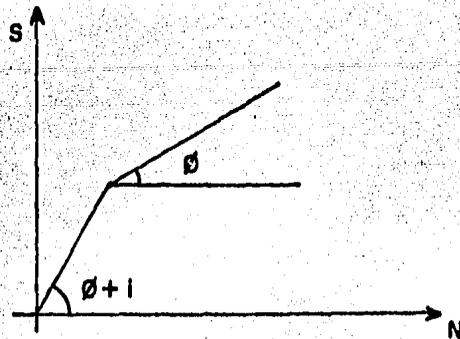


Fig. 4.4 Comportamiento esfuerzo vs resistencia al corte

IV.3 METODOS DE ANALISIS

La estabilidad de la margen izquierda de Chicoasén fue revisada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Alberro, Cuellar 1975) En este tema se plantea un análisis bidimensional basado en las pruebas de mecánica de rocas y datos geológicos.

Sin embargo, como ya se trató anteriormente, los resultados de las pruebas no siempre representan fielmente el fenómeno estudiado, por esta razón en este tema se plantea la estabilidad en rangos de valores, tanto para las propiedades del macizo rocoso como para los factores de seguridad.

Las fuerzas que actúan sobre la masa deslizante son por una parte las que propician el movimiento, por otra las que mantienen el estado de equilibrio, fuerzas motoras y resistentes, respectivamente. El factor de seguridad (FS) se define como "la razón de fuerzas resistentes y las fuerzas motoras, en la superficie de falla".

IV.3.1 ANALISIS EN CONDICIONES ESTATICAS

Los análisis estáticos se efectuaron siguiendo varios métodos. El primer método fue el de suponer una

superficie de falla plana. En este análisis se consideró una sección geológica simplificada que se suponía inestable, los resultados no son del todo confiables pero dan una idea de la condición de equilibrio en que se encuentra el talud, de modo que representa una primera aproximación con la cual se decidió que parte de la ladera requería de un análisis minucioso.

Dadas las condiciones de la ladera izquierda de Chicoasén, en cuanto a su geometría, fracturamiento y estratificación, el procedimiento de dovelas es el que más fielmente se adapta a las condiciones del sitio. En este método la masa rocosa se divide en varias secciones verticales llamadas dovelas. Las fuerzas actuantes sobre cada dovela son evaluadas por equilibrio al límite. El equilibrio de la masa completa, se determina con la suma de fuerzas de todas las dovelas.

Considerando las fuerzas actuantes en una dovela de longitud AL (fig. 4.5). Estas serán: el peso propio (W), alguna otra fuerza actuando sobre la misma (Q), las fuerzas normales (AF_n), de corte (AF_t) actuando en la superficie de falla, además las fuerzas normal y de corte (E_1, E_2, T_1, T_2) que actúan sobre las caras de la dovela. La influencia de estas fuerzas (AF_t, AF_n) es función del ángulo (α). Los empujes laterales están afectados por el echado de la falla, no así el empuje hidrostático el cual es función del gradiente.

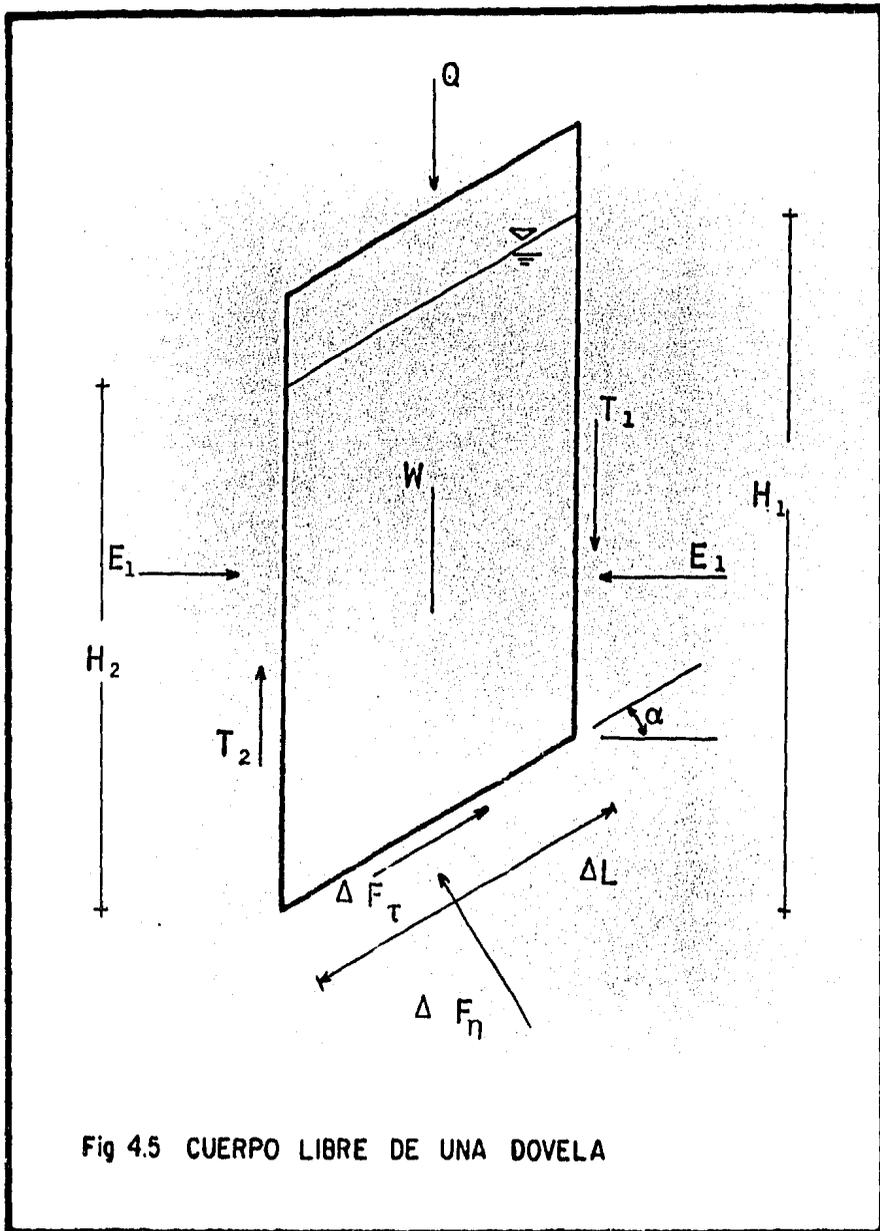


Fig 4.5 CUERPO LIBRE DE UNA DOVELA

Bajo estas condiciones, el sistema es estáticamente indeterminado, y para obtener una solución será necesario establecer algunas hipótesis concernientes a la magnitud y punto de aplicación de las fuerzas E_1, E_2, T_1, T_2 .

Si se supone que la resultante de las fuerzas de E_1 y T_1 es colineal e igual a la resultante de E_2 y T_2 , los cálculos se simplifican.

Los valores de cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), presión de poro (U) y superficie de falla, son conocidos ó pueden ser evaluados con cierta aproximación.

Aplicando la condición de equilibrio se tiene:

$$\Delta F_n = W \cos \alpha \quad \text{--- 4.6a.}$$

$$\Delta F_t = W \sin \alpha \quad \text{--- 4.6b}$$

El esfuerzo normal y de corte a lo largo de ΔL será:

$$\sigma_n = \frac{1}{\Delta L} W \cos \alpha \quad (\text{normal})$$

$$\tau = \frac{1}{\Delta L} W \sin \alpha \quad (\text{corte})$$

La resistencia al corte S será:

$$S = c' + \sigma' \tan \phi \quad \text{--- 4.7}$$

en donde: σ' Esfuerzo normal efectivo
 c' Cohesión
 ϕ Ángulo de fricción interna

El esfuerzo cortante total, será la suma de las fuerzas cortantes en cada dovela. La resistencia al corte en cada dovela será:

$$S_{\Delta L} = c' \Delta L + (W \cos \alpha - U \Delta L) \tan \phi \quad \text{--- 4.8}$$

El factor de seguridad para cada dovela está dado -- por la relación:

$$FS = \frac{S}{G}$$

y para todo el macizo cuando existen condiciones hidrostáticas.

$$FS = \frac{\sum_{i=0}^n [C' \Delta L_i + (W_i \cos \alpha_i - U \Delta L_i - \Delta v_i \sin \alpha_i) \tan \phi]}{\sum_{i=0}^n (W_i \sin \alpha_i + V_i \cos \alpha_i)} \quad \text{--- 4.9}$$

En donde:

$$V_i = \frac{(H_1 - H_2)^2}{2} ; \quad U_i = \frac{H_1 + H_2}{2}$$

En el caso particular de Chicoasén; el valor de $C'=0$ siempre que $\phi = (\phi+i)$, lo que se demostró anteriormente --- (tema IV.2)

En un análisis minucioso se deberán considerar las - fuerzas E y T . Para el elemento de la fig. 4.5 la sumatoria de fuerzas en dirección vertical resulta:

$$\Delta F_n \cos \alpha = W + (T_1 - T_2) - U \Delta L \cos \alpha - \Delta F_t \sin \alpha \quad \text{--- 4.10}$$

Si el talud no está al borde de la falla ($FS > 1$) la - fuerza tangencial es igual a la resistencia al corte en la - superficie de falla, dividida entre el factor de seguridad - (FS) según la ecuación:

$$\Delta F_t = \frac{\Delta F_n \tan \phi}{FS} \quad \text{--- 4.11}$$

Sustituyendo en la ec 4.11 y despejando ΔF_n :

$$\Delta F_n \cos \alpha = W + (T_1 - T_2) - U \Delta L \cos \alpha - \frac{\Delta F_n \sin \alpha \tan \phi}{FS}$$

$$\Delta F_n \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \right) = W + (T_1 - T_2) - U \Delta L \cos \alpha$$

quedando:

$$\Delta F_n = \frac{W + (T_1 - T_2) - U \Delta L \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS}} \quad \text{--- 4.12}$$

en el caso mas general se tiene:

$$\Delta F_t = W \sin \alpha + (V + E_1 - E_2) \cos \alpha \quad \text{--- 4.13}$$

Definiendo al factor de seguridad como:

$$F_s = \frac{\sum \Delta F_n \tan \phi}{\sum \Delta F_t} \quad \text{--- 4.14}$$

sustituyendo 4.12 y 4.13 en 4.14 se tiene finalmente:

$$F_s = \frac{\sum \left[\frac{W + (T_1 - T_2) - U \Delta L \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{F_s}} \right] \tan \phi}{\sum \left[W \sin \alpha + (V + E_1 - E_2) \cos \alpha \right]} \quad \text{--- 4.15}$$

Para obtener el factor de seguridad (FS) de la ec 4.15, el valor de $T_1 - T_2$ debe ser obtenido por aproximaciones sucesivas. Los valores de prueba de E_1 y T_1 deben satisfacer el equilibrio en cada dovela y las condiciones:

$$\sum (E_1 - E_2) = 0 \quad ; \quad \sum (T_1 - T_2) = 0$$

Los cálculos se simplifican, si el término $T_1 - T_2 = 0$

El valor de FS es calculado como una primera aproximación por el método de falla plana y es sustituido junto con las propiedades invariantes (ϕ', α) del talud, en la ec 4.15

Si el valor de FS calculado en la ec 4.15 difiere sustancialmente del estimado primeramente, se itera hasta la aproximación deseada.

IV.3.2 ANALISIS EN CONDICIONES DINAMICAS

El análisis dinámico es análogo al anteriormente descrito de dovelas, con la diferencia de que se supone un temblor estacionario y un amortiguamiento interno nulo. La dirección del sismo se supone paralela al talud y los efectos del sismo sobre la estabilidad dependen de la masa de

cada dovela y de el coeficiente sísmico de la zona (Cs).

El coeficiente sísmico se define como la relación -- entre la aceleración del terreno debida al sismo, (que es -- función de la magnitud del sismo y de la distancia al foco) y la aceleración de la gravedad, de acuerdo a la siguiente -- ecuación:

$$C_s = \frac{\text{Aceleración del terreno}}{\text{Aceleración de la gravedad}} \quad \text{--- 4.16}$$

de modo que la ec. 4.13 quedará en estas condiciones como:

$$F_s = \frac{\sum \left[\frac{W(1 - C_s \sin \alpha) + (T_1 - T_2) - UAL \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \beta}{F_c}} \right] \tan \beta}{\sum \left[W(1 + C_s \cos \alpha) \sin \alpha + V + \frac{(E_1 - E_2)}{\cos \alpha} \right]} \quad \text{--- 4.17}$$

La consideración anterior es estrictamente válida si las dovelas son diferenciales, ésto es de longitud unitaria, ya que en tales condiciones la fuerza del sismo actúa a la mitad de la altura total de la dovela y mediante un par de fuerzas, ésta se transporta a la base.

Sin embargo, la consideración supone una plastificación del terreno, que en realidad no sucede en el talud. Se optó por hacer coincidir la fuerza del sismo con el centro de gravedad de cada dovela por facilidad de cálculo.

Mediante los métodos y consideraciones antes descritas se evaluó la estabilidad de cada una de las seis secciones geológico-estructurales (4.6, 7 y 8) de la zona inestable de Chicoasén.

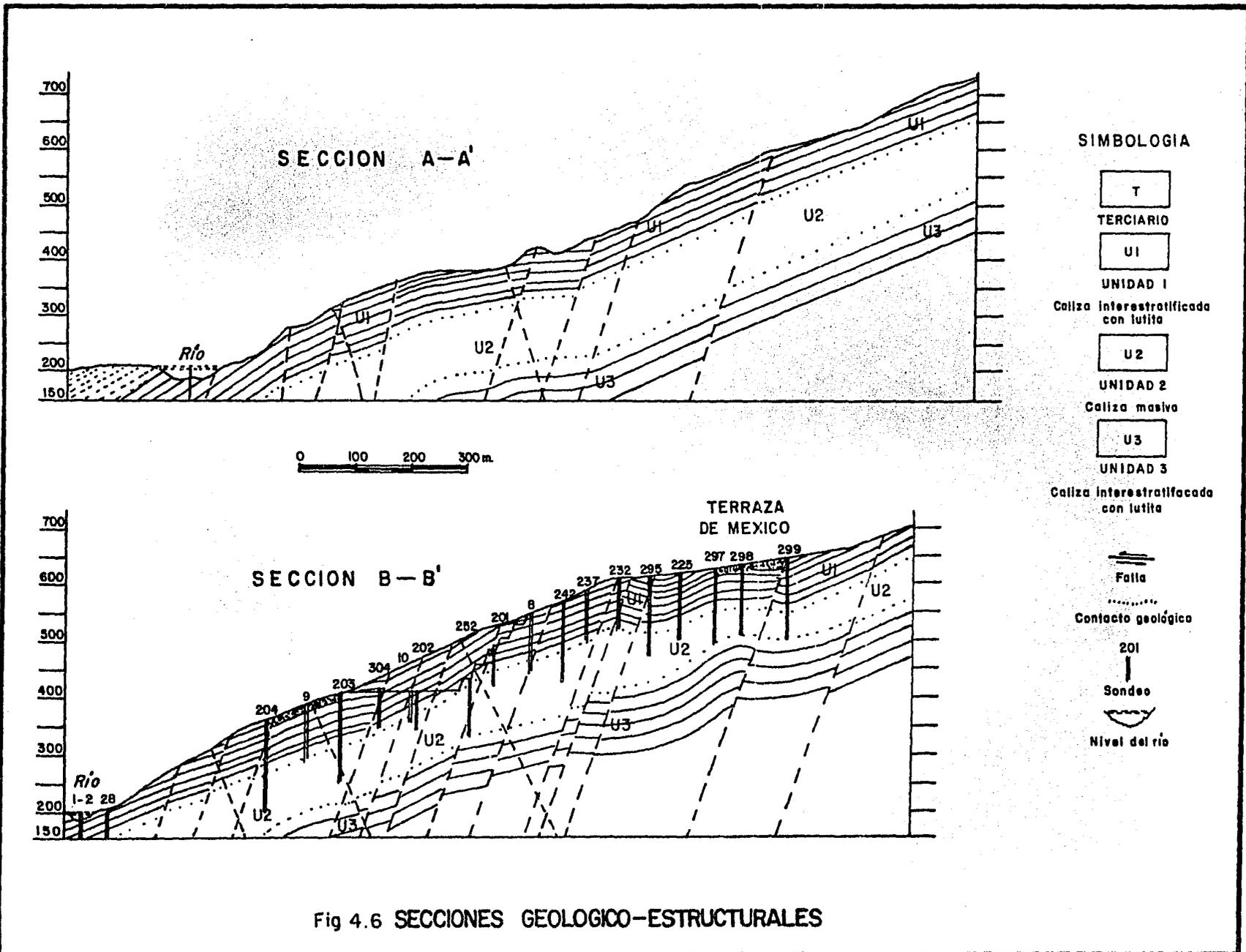


Fig 4.6 SECCIONES GEOLOGICO-ESTRUCTURALES

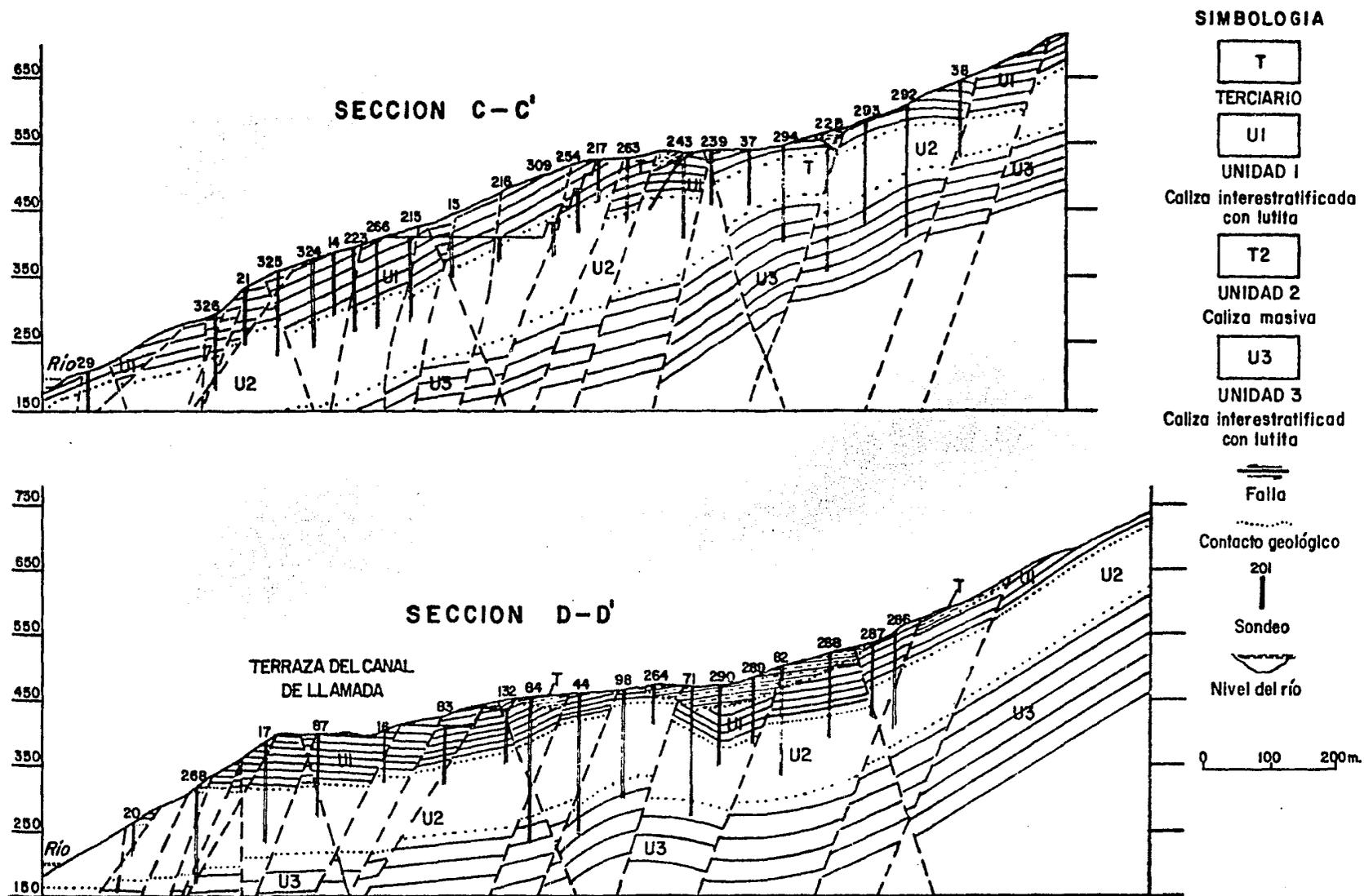


Fig 4.7 SECCIONES GEOLOGICO-ESTRUCTURALES

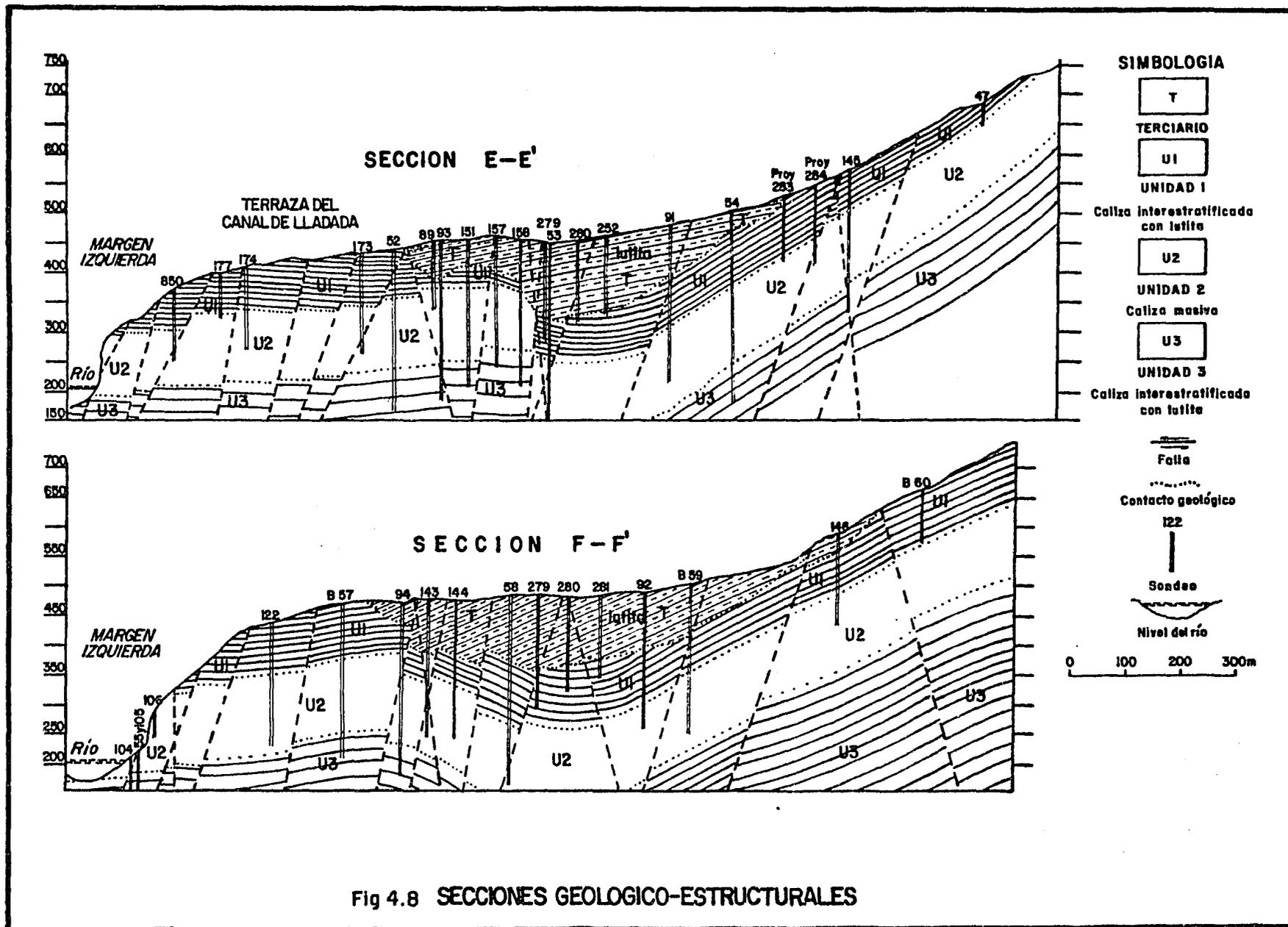


Fig 4.8 SECCIONES GEOLOGICO-ESTRUCTURALES

El método fue aplicado para una infinidad de condiciones, tanto hidrostáticas como para diferentes coeficientes sísmicos y las combinaciones de éstas.

Ante lo laborioso del método, el cálculo de el factor de seguridad se calculó con una mini-computadora HP de 64 k. y los resultados representados en las gráficas para cada sección. (fig. 4.9, .10, .11, .12, .13, .14).

Cada dovela estuvo dividida por un par de fracturas sub-verticales reales y el plano de falla se consideró el contacto litológico entre las unidades UI/U2.

La solución a la estabilidad, durante la construcción, se basa en el análisis de estabilidad para cada dovela aisladamente. De esta forma sólo en la dovela que no está en equilibrio se reducen las fuerzas motoras.

IV.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La estabilidad de la "zona inestable" de la presa Chicoasén, fue evaluada tomando en cuenta los datos proporcionados por:

- 1.-Resultados de pruebas de corte en campo y laboratorio.
- 2.-Estratigrafía del macizo rocoso obtenida en barrenos, socavones, trinchera, levantamientos superficiales y geofísicos.
- 3.-Observaciones visuales en la trinchera y socavones de los "detalles geológicos menores".
- 4.-Investigaciones sobre los detalles geológicos menores desde un punto de vista teórico.

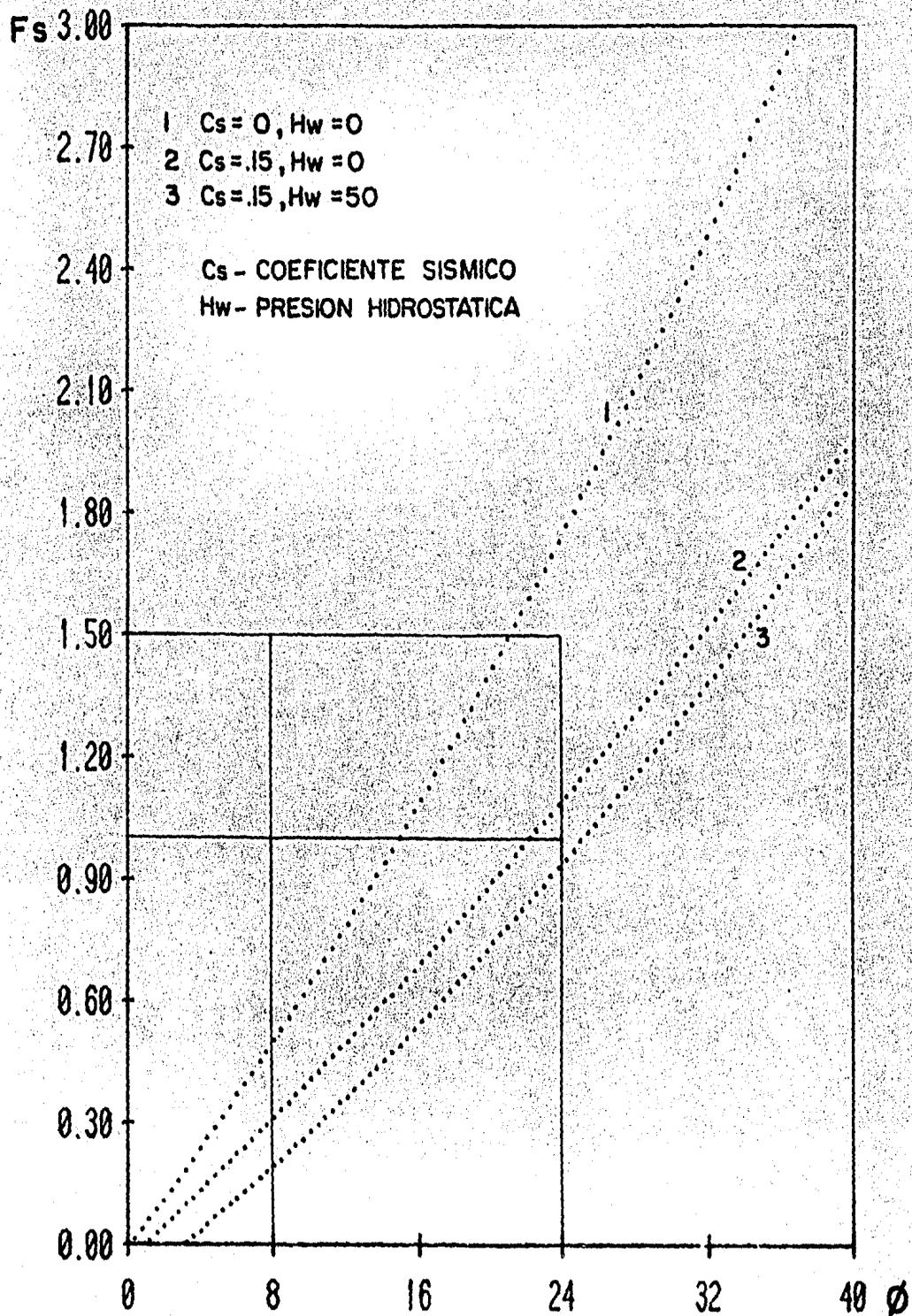


FIG. 4.9 SECCION GEOLOGICA A-A

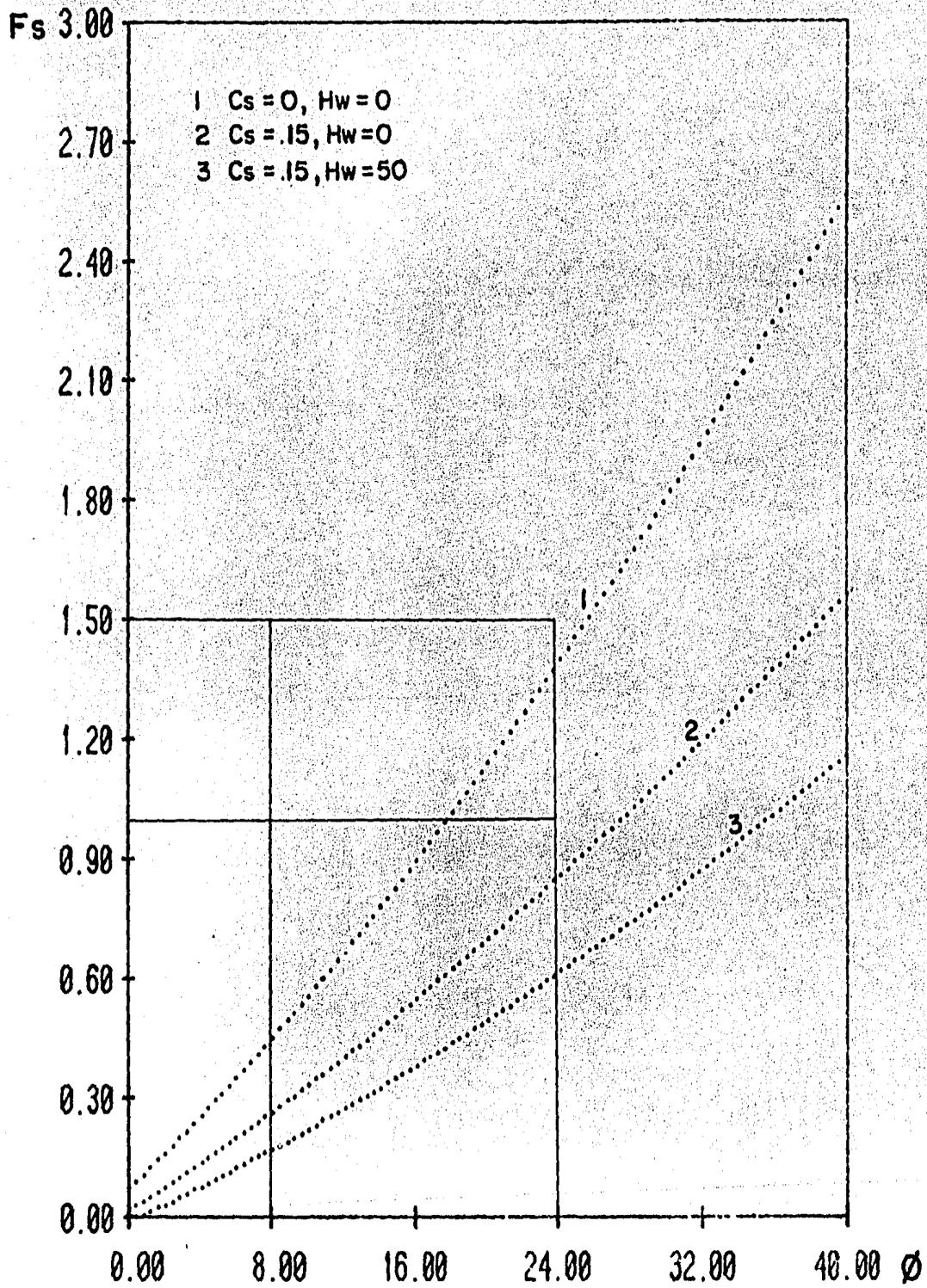


FIG. 4.10 SECCION GEOLOGICA B-B

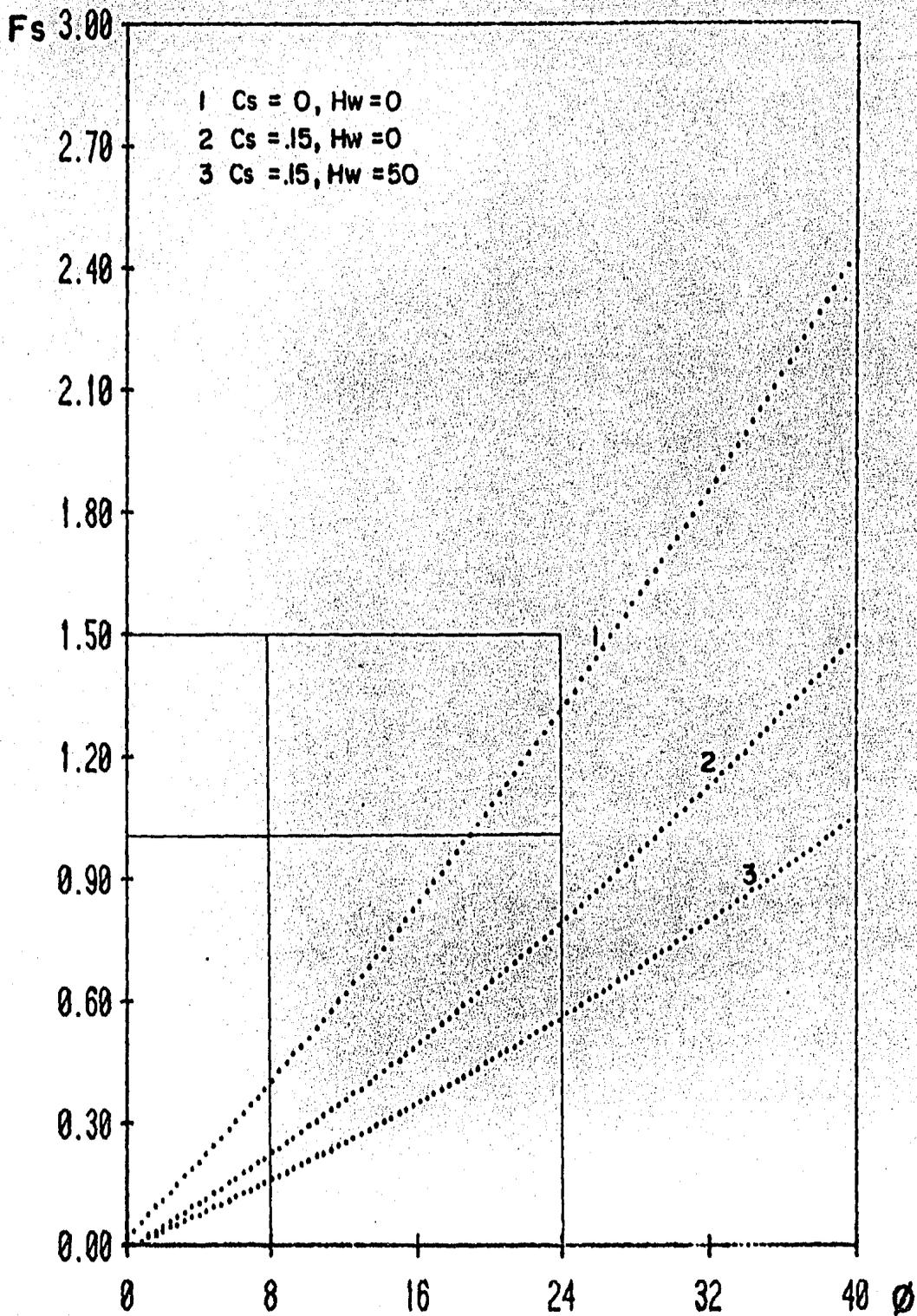


FIG. 4.11 SECCION GEOLOGICA C-C

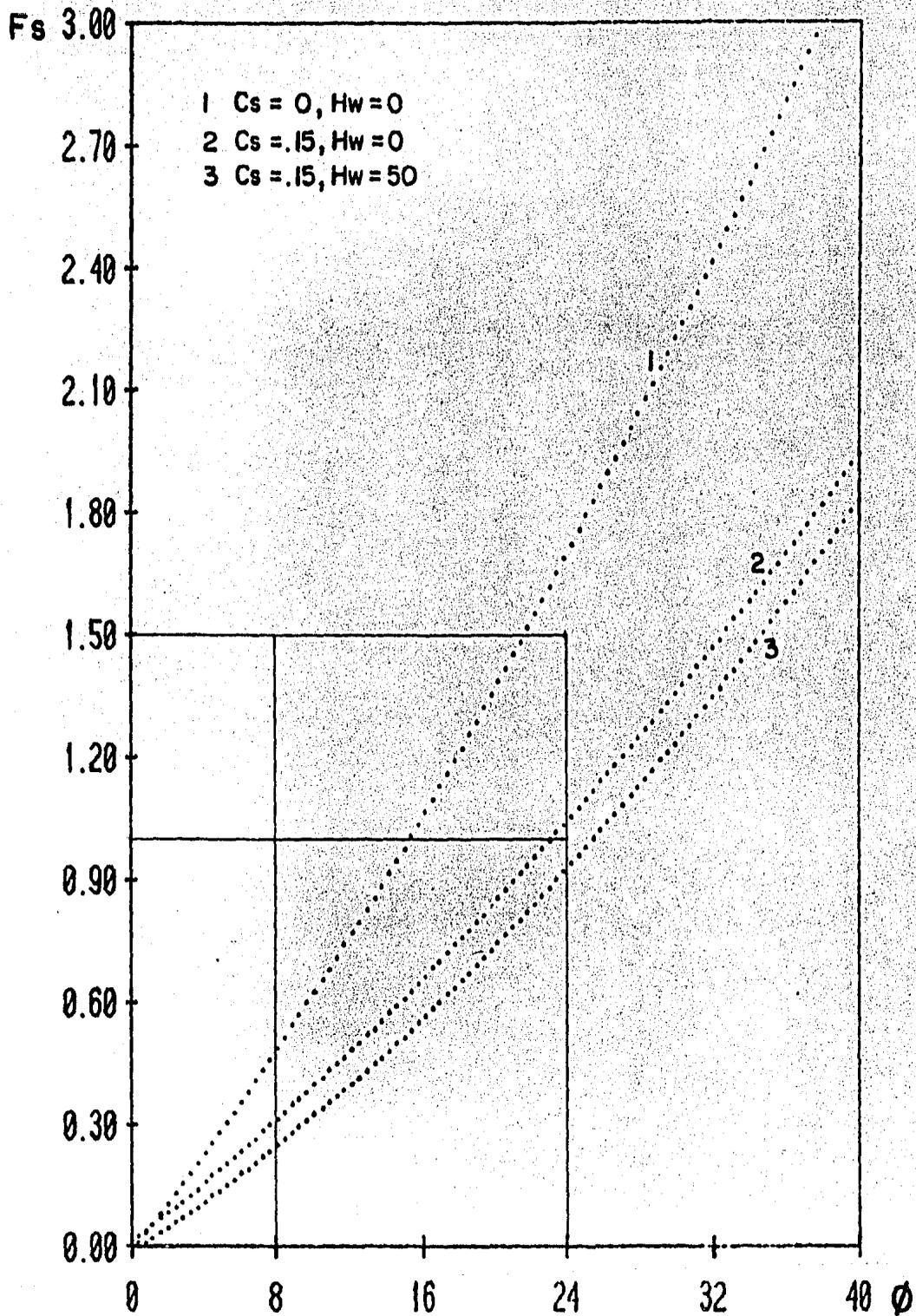


FIG. 4.12 SECCION GEOLOGICA D-D

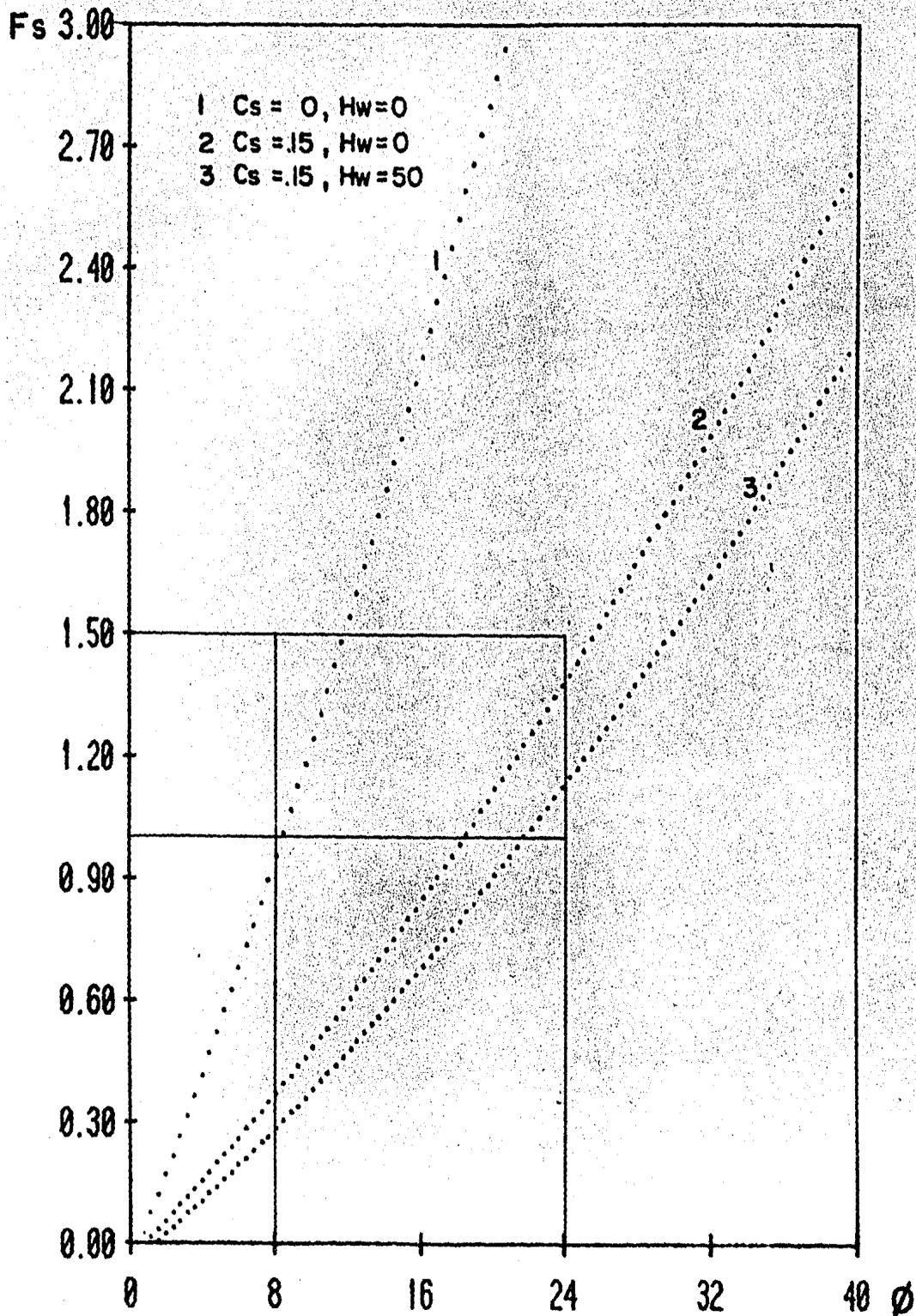


FIG 4.13 SECCION GEOLOGICA E-E

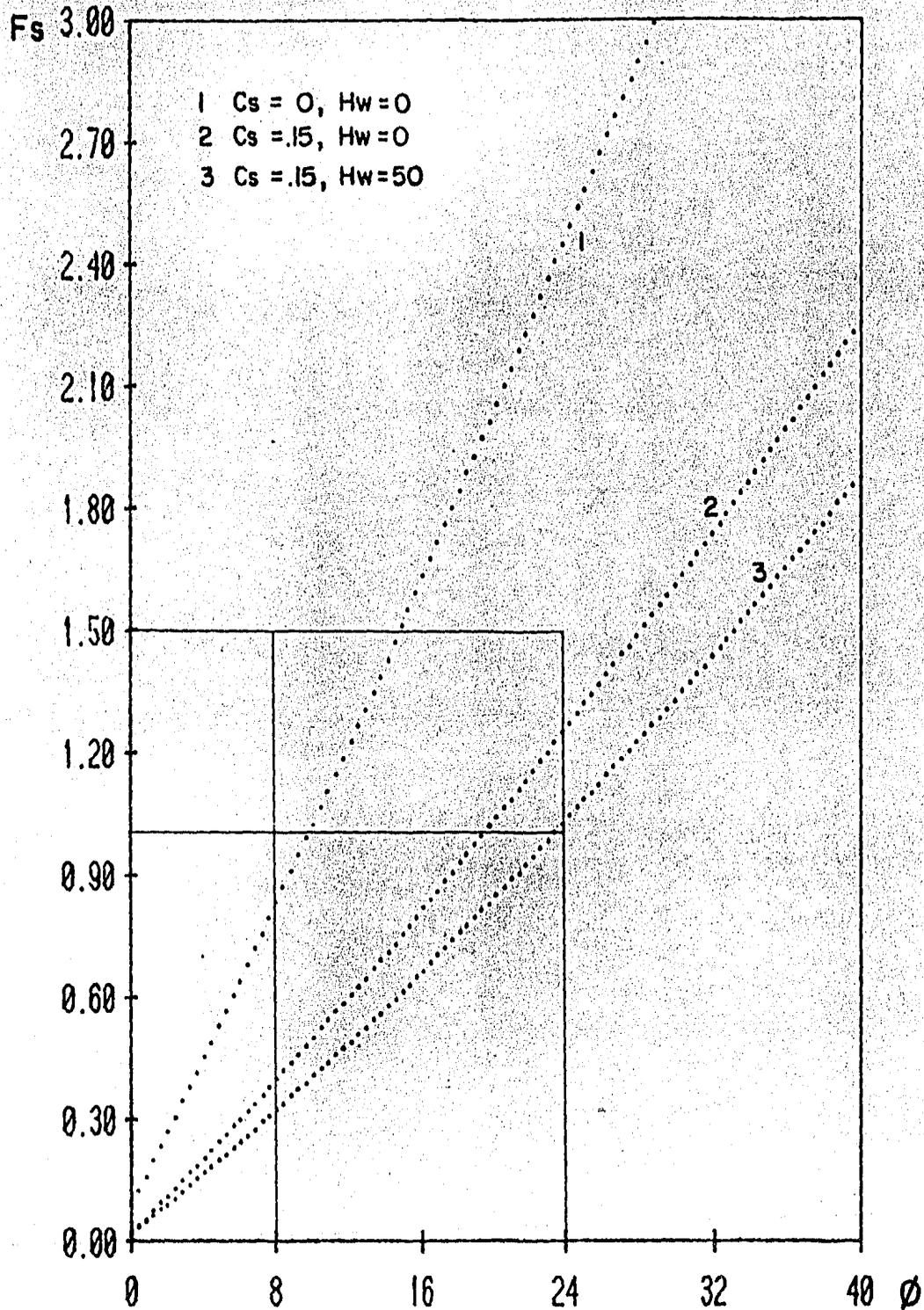


FIG. 4.14 SECCION GEOLOGICA F-F

5.-Condiciones de trabajo de la presa (variaciones en el nivel de agua freática y sismo)

Con estas consideraciones se calculó el factor de seguridad de cada sección, haciendo intervenir los datos antes mencionados.

Ante la incertidumbre de un valor real del ángulo de fricción interna ϕ , se plantea la estabilidad bajo rangos de valores en diferentes condiciones.

El método de análisis usado para evaluar la estabilidad del macizo rocoso, tanto en condiciones dinámicas como en condiciones estáticas, es sin duda el que mas se apega a la realidad del problema y los resultados que se obtengan serán tan reales como real sean la exploración en campo y las pruebas de laboratorio.

Para la aplicación del método empleado es necesario el uso de computadora, dado el número de iteraciones y cálculos que intervienen en el análisis.

Considerando $(T_1 - T_2) \frac{d\phi}{\phi} = 0$ en el cálculo del factor de seguridad, se puede inducir un error del uno por ciento, mientras que analizándolo con la ec. 4.9 se puede incurrir en un error de hasta 15 por ciento.

Los resultados del análisis muestran que, a excepción de las secciones geológicas EE' y FF' (fig.4.8) todas las demás son inestables ante condiciones de vaciado rápido y considerando un sismo cuya aceleración máxima sea de 15 g.

Esto último es poco probable que suceda conjuntamente con el vaciado.

De acuerdo a la gráfica de estabilidad (fig.4.9) correspondiente a la sección geológica A A' (fig. 4.6) ésta presenta estabilidad bajo condiciones estáticas, aunque con un factor de seguridad pequeño. En condiciones dinámicas y sin empuje hidrostático, la sección es estable con factores de seguridad aceptables. Sin embargo cuando se presenta un sismo con aceleración de .15 g. y un vaciado rapido, la sección presenta estabilidad crítica e incluso inestabilidad si el ángulo de fricción fuera el residual.

La sección geológica BB¹ (fig.4.6 b) muestra en la gráfica correspondiente (fig.4.10) estabilidad crítica en condiciones estáticas, en condiciones de trabajo y condiciones dinámicas, la sección es inestable. Se aprecia en la gráfica (fig.4.16) una influencia mayor en la inestabilidad, debido al sismo mas que al vaciado rapido, aunque éste último ----- tambien es muy importante. La inestabilidad es creada en mayor proporción por las dovelas comprendidas a partir de la cota 200 y hasta la 550, lo cual es lógico si se toma en --- cuenta que el efecto del sismo es proporcional a la altura de cada elemento.

La sección geológica CC' (fig. 4.7) muestra en la gráfica de estabilidad (fig. 4.11) estabilidad crítica, sin embargo se puede afirmar que la estabilidad está dada por un efecto estructural del macizo, ya que en forma bidimensional (aislada) puede caer en inestabilidad.

Ante la ocurrencia de un sismo la sección se inestabiliza, asi como bajo condiciones de trabajo; esto es, varia ciones en el nivel freático. Las dovelas que mas afectan a la estabilidad, son las comprendidas desde la cota 250 a la 470. La inestabilidad creada por las viariaciones en el nivel freático afectan con mayor proporción a los bloques ----

de la cota 400 a la 550 ya que ahí los gradientes hidráulicos son máximos.

La sección geológica DD' (fig.4.7) es estable para condiciones estáticas y dinámicas (fig.4.12). La estabilidad crítica ó bien inestabilidad potencial solamente se manifiesta por la ocurrencia de un sismo con aceleración máxima de .15 g. contemporáneo con un vaciado rápido. Esta condición, como se aclaró anteriormente, es poco probable. Es conveniente hacer notar que la estabilidad de esta sección a partir de la cota 400 y hasta la 750 está dada únicamente por el pliegue que se presenta al centro de la sección.

Hacia el extremo norte de la "zona inestable" se presenta un depósito discordante de lutitas del Terciario, el cual queda ubicado en las secciones geológicas EE' y FF' (fig.4.8).

La sección geológica EE' (fig.4.8) es estable para condiciones estáticas, dinámicas y aun dinámicas bajo condiciones de trabajo (fig. 4.13).

La sección geológica FF' (fig.4.8) es estable para condiciones estáticas y dinámicas, para condiciones dinámicas con vaciado rápido, la sección presenta estabilidad crítica.

En los dos anteriores casos se consideró como posibilidad la falla por el contacto entre las unidades U2/U3, obteniéndose factores de seguridad muy altos que representan ningún riesgo de deslizamiento, es importante hacer notar que al considerar la falla por el contacto U2/U3 el efecto estructural es mas importante debido al pliegue, fallamiento y depósitos terciarios sobre estas secciones.

La solución a la estabilidad de la zona potencial de deslizamiento son en términos generales: la reducción de las fuerzas motoras mediante descarga ó drenaje del macizo, o -- bien por el aumento de las fuerzas resistentes mediante anclaje ó acumulación de material al pie del talud.

De acuerdo a las condiciones del talud, el pretender estabilizarlo mediante anclas resulta oneroso en exceso, ya que la densidad, así como la longitud de ellas, representa una cantidad muy grande de acero; por otra parte, este trabajo requiere de una perforación previa y una inyección posterior, además de no existir datos confiables sobre la fatiga de las anclas a largo plazo y bajo ciclos de histéresis, por lo que esta solución queda descartada.

La acumulación de material al pie del talud podría ser solución si se contará con material de desperdicio suficiente para aumentar las fuerzas resistentes; sin embargo, la explotación de bancos es cara, aunado al gran volumen del que se requiere, se descarta esta alternativa de solución.

Drenar mediante barrenos horizontales la sección geológica AA' representa una solución expedita y económica, además de influir sobre la estabilidad del área adyacente al -- considerar un comportamiento estructural del macizo rocoso.

La estabilidad bajo condiciones dinámicas de la sección geológica BB', únicamente se puede asegurar por reducción del peso (fuerza motora) en las dovelas comprendidas entre las cotas 400 a 550, en un espesor variable 25 a 50 m.

La sección geológica CC' se estabilizará para condiciones dinámicas, únicamente reduciendo el peso en las dovelas

las ubicadas entre la cota 400 a la 520, en un espesor entre 25 y 50 m.

En las dos secciones analizadas (BB' y CC') será -- muy conveniente realizar los cortes con bermas de 7 m. de -- ancho, drenando las paredes verticales mediante barrenos ho -- rizontales con cuando menos 30 m. de longitud. Esta solu -- ción propicia el deslizamiento de bloques aislados (caídos) que pueden ocasionar accidentes durante la explotación. El corte de piso tendrá que ser horizontal, de modo que aunque exista deslizamiento en la parte superior, la masa deslizante no se precipite hacia el embalse. El material excavado -- puede usarse para enrocamiento en la cortina, si cumple con la calidad especificada; el desperdicio será tirado al pie del talud, de este modo el factor de seguridad se incrementará considerablemente. En ambas secciones las condiciones de estabilidad bajo la cota 400 se ven favorecidas por la -- reducción de fuerzas motoras, sin embargo en caso de presen -- tarse un deslizamiento, ésto no afectaría a la cortina, ya que no existiría una transferencia de volúmen digna de con -- siderarse.

La sección geológica DD' adquiere estabilidad para las condiciones mas desfavorables, con solo drenar la zona -- mediante barrenos horizontales largos, estos drenes queda -- ran de la cota 400 hacia arriba.

El área norte de la "zona inestable" es estable para cualquier condición como lo demuestran las gráficas ---- (fig. 4.13, 4.14), como lo demuestran las gráficas de las -- secciones geológicas EE' y FF'; sin embargo, se deben espe -- rar deformaciones y agrietamientos en dicha área debido a -- la relajación de esfuerzos provocada por la excavación y -- drenaje del área adyacente.

Es muy importante instrumentar toda la zona inestable mediante piezómetros e inclinómetros, así como realizar levantamientos geosísmicos periódicamente. Solamente -- de este modo se podrá evaluar la validez de la solución tomada, así mismo se podrá detectar alguna deformación inaceptable, lo que es de esperarse en mayor grado en las secciones geológicas DD', EE' y FF' debido a los depósitos terciarios.

En vista de la complejidad geotécnica y la implicación económica que tiene la solución de un problema análogo, se hace indispensable que se investigue más a fondo la mecánica del fenómeno para dar soluciones seguras y económicas en proyectos en los que no se cuenta con recursos para realizar exploraciones tan costosas.

B I B L I O G R A F I A

INFORME GEOLOGICO DE LA ZONA INESTABLE DE LA MARGEN
IZQUIERDA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO CHICOASEN, --
CHIAPAS

García H., C.
CFE 1972

INFORME GEOLOGICO P.H. CHICOASEN,
Residencia de Geología,
CFE 1975

GEOLOGIA ZONA INESTABLE P.H. CHICOASEN,
Riva Palacio R., y García H., C.
CFE 1975

ESTUDIO FOTOLOGICO DEL PROYECTO CHICOASEN, CHIA--
PAS.

Guzmán A., A.
CFE 1976

GEOMORFOLOGIA ESTRUCTURAL DEL SITIO DE LA PRESA CHI-
COASEN.

Kostenko, N.P., y Riva Palacio, R.
CFE 1976

DETERMINACION DEL RIESGO SISMICO PARA EL PROYECTO -
CHICOASEN.

García H., C.
CFE 1974

SEISMIC RISK OF THE CHICOASEN FAULT, A BRIEF REPORT;

Lomnitz, G.:
Instituto de Ingeniería, UNAM, 1976

RIESGO SISMICO EN EL CAÑON EL SUMIDERO, CHIAPAS:

Trigos, J.L., y Esteva, L.
Instituto de Ingeniería, UNAM, 1974

FUNDAMENTOS DE INGENIERIA SISMICA

M.M. Newmark, E. Rosenblueth
Diana, 1971

INFORME SOBRE LOS ESTUDIOS GEOTECNICOS REALIZADOS -
EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIO GRIJALVA PARA EL ---
APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO DE CHICOASEN, CHIA--
PAS;

Geofimex S.A., 1976

PROYECTO HIDROELECTRICO CHICOASEN; PIEZOMETRIA EN -
LAS LADERAS DE AMBAS MARGENES

Espinosa G., L. 1976

STABILITY OF CANYON WALLS OF CHICOASEN DAMSITE,

5th. Panamerican Conf. Soil Mech. Found.

Eng. Buenos Aires, 1975

TECHNICAL LETTER No.1: EVALUATION OF LANDSLIDE PO--
TENTIAL; C.F.E. CHICOASEN HIDROELECTRIC DEVELOPMENT
(CHIAPAS)

Deere, D.U. and Patton, F.D.,

CFE 1974

TECHNICAL LETTER No.2: EVALUATION OF SLOPE STABILI-
TY STUDIES; C.F.E. CHICOASEN HIDROELECTRIC DEVELOP-
MENT (CHIAPAS).

Patton, F.D., 1975

INFORME No.2 SOBRE EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LA
LADERA IZQUIERDA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO CHICOA
SEN, CHIS., EN UNA ZONA QUE ABARCA APROXIMADAMENTE
1 Km. HACIA AGUAS ARRIBA, DESDE EL EJE DE LA CORTI-
NA;

Núñez G.A., Fujigaki, L.J. y Cuéllar B.R.,

CFE 1973

ESTABILIDAD DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL SITIO DE CHI-
COASEN, 1o. INFORME

Alberro, J.A.

Instituto de Ingeniería UNAM, 1974

ESTABILIDAD DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL SITIO DE CHI-
COASEN, 2o. INFORME

Alberro, J.A.

Instituto de Ingeniería UNAM, 1975

ESTABILIDAD DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL SITIO DE CHI-
COASEN, 3o. INFORME

Alberro, J.A.

Instituto de Ingeniería UNAM, 1975

GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO CHI
COASEN CHIAPAS
R. Riva Palacio
CFE 1980

INVESTIGACIONES SOBRE EL DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DU-
RANTE LA CONSTRUCCION DE LA PRESA CHICOASEN, MEXICO
R.J. Marsal, E. Moreno G.
CFE 1979

PRINCIPALES PROVINCIAS GEOGRAFICAS Y GEOLOGICAS DE-
LA REPUBLICA MEXICANA
Ezequiel Ordoñez
Güa del Explorador Minero, 1946

PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO
R.J. Marsal, D. Resendiz N.
Limusa, 1979

FUNDATION ENGINEERING HANDBOOK
H.F. Winterkorn, H. Yang Fang
Van Nostrand Reinhold Co., 1975

ROCK MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE
K.G. STAGG, OC. ZINKIEWICZ
Jhon Wiley & Sons, 1968

ASPECTOS GENERALES DE LA MECANICA DE ROCAS
E.G. Gaziev
Instituto de Ingeniería UNAM, 1970

CONTRIBUCIONES A LA MECANICA DE LOS MEDIOS GRANULA-
RES.
R.J. Marsal
CFE 1980