

21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN
LA OBRA DE TOMA Y VERTEDOR DEL
P. H. AGUAMILPA, NAYARIT**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA GEOLOGA
P R E S E N T A:
LYDIA GABRIELA ORTEGA BUCIO



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA OBRA DE TOMA Y VERTEDOR
DEL P.H. AGUAMILPA, NAYARIT.

Índice	págs.
I. Introducción	
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivo.....	3
II. Aspectos Generales del Proyecto	
2.1 Localización y acceso a la obra.....	4
2.1.1 Características de la Cuenca del Río Santiago..	5
2.2 Descripción del Proyecto.....	7
2.2.1 Obras de Desvío.....	7
2.2.2 Obras de Contención.....	8
2.2.3 Obras de Generación.....	9
2.2.4 Obras de Excedencias.....	10
III. Geología	
3.1. Litología.....	12
3.2. Alteración.....	15
3.3. Estructuras geológicas.....	16
3.4. Tectónica.....	18

3.5.	Sismicidad.....	19
------	-----------------	----

IV. Litología y Estructuras Geológicas en el Vertedor y Obra de Toma

4.1	Margen izquierda- Obra de Excedencias.....	21
4.1.1	Litología.....	22
4.1.2	Estructuras.....	23
4.1.3	Integración Geología - Geofísica.....	25
4.2	Margen derecha- Obra de Toma.....	26
4.2.1	Litología.....	25
4.2.2	Estructuras.....	28
4.2.3	Integración Geológica - Geofísica.....	31
4.3	Conclusiones.....	32

V. Propiedades Mecánicas de los macizos Rocosos

5.1	Margen izquierda.....	34
5.2	Margen derecha.....	35
5.3	Propiedades mecánicas del macizo rocoso.....	36

VI. Análisis de estabilidad en los taludes del Vertedor y Obra de toma

6.1	Análisis estereográfico.....	43
6.2	Análisis vectorial.....	45

VII. Aspectos sobresalientes del análisis y tratamiento del macizo rocoso

7.1 Ubicación de las cuñas.....	47
7.2 Condiciones de estabilidad en cada margen.....	47

VIII. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Geología.....	49
8.2 Análisis de estabilidad.....	50
Figuras.....	51
Bibliografía.....	87

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 Generalidades

La mecánica de rocas estudia el comportamiento de masas rocosas bajo la acción de fuerzas producidas por fenómenos naturales o resultantes de excavaciones o construcciones realizadas por el hombre. Para lograrlo, es preciso determinar las propiedades mecánicas del macizo rocoso, mediante ensayos de campo y de laboratorio, cuyos resultados cuantitativos permiten la idealización de modelos ya sea matemáticos o mecánicos a escala, o correlaciones empíricas, que permiten evaluar las condiciones de un problema específico.

Un macizo rocoso, en general, está formado por rocas de distinto origen geológico, con diferentes condiciones de fragmentación, grado de alteración y, a menudo, se encuentra discontinuo por fallas o cavernas. Además, los constantes movimientos de la corteza terrestre introducen esfuerzos naturales variables en magnitud, dirección y sentido, que influyen considerablemente en las propiedades mecánicas de las rocas. Al utilizar las leyes de la mecánica para investigar el comportamiento de una masa de roca, se debe considerar un medio discontinuo, heterogéneo y anisótropo, cuyas características no se puedan controlar a voluntad y deben ser estudiadas en cada caso particular, a fin de conocer los límites de validez de la aplicación de las teorías.

1.2 Planteamiento del Problema

El problema implica primeramente el conocimiento y comprensión del medio físico, es necesario recordar que los deslizamientos de taludes son regidos por sus características (litológicas y geológico

estructurales) así como la heterogeneidad, la anisotropía, la red de discontinuidades y el estado en que se encuentran las superficies de los planos de estratificación, así como, las condiciones del agua en el subsuelo. Es importante tener presente la geomorfología del área, ya que esta puede ser una herramienta para encontrar los elementos de las estructuras geológicas y las manifestaciones de la dinámica externa (deslizamientos antiguos).

Para que se presenten deslizamientos deben presentarse ciertas condiciones geométricas que hagan cinemáticamente posible el deslizamiento, como el hecho de que la pendiente topográfica sea más fuerte que la pendiente de la superficie de deslizamiento. Además se deben tener en cuenta ciertas condiciones de fuerte presión hidrostática y la posibilidad de ruptura al pie del talud.

La cinemática del deslizamiento depende también de la orientación y la situación de los límites laterales del plano potencial de deslizamiento con la del talud. Las condiciones cinemáticas y geométricas de un deslizamiento están estrechamente ligadas a condiciones geológicas y características del medio, que se presenta como un sistema de discontinuidades que determinan los límites de una masa inestable, así como la posibilidad y el sentido del movimiento.

El problema para determinar la resistencia al deslizamiento entre dos superficies rocosas, se multiplica a medida que el tamaño de la masa rocosa se incrementa a consecuencia de la heterogeneidad de la superficie de deslizamiento y de las condiciones mecánicas.

En los análisis de estabilidad es normal suponer que:

- el bloque y la superficie de deslizamiento son infinitamente rígidos
- la resistencia al deslizamiento es constante a lo largo de toda la superficie de contacto.
- la presión de contacto, los esfuerzos normales y tangenciales son

uniformes.

- la superficie de deslizamiento es plana.
- la presencia de agua entre el bloque y la superficie de deslizamiento produce los mismos efectos a lo largo de toda la superficie de contacto.
- no existe una ruptura progresiva, el análisis se limita a representar el comportamiento mecánico.

1.3 Objetivos

En el desarrollo de este trabajo se pretenden cubrir tres objetivos fundamentales:

- a) Ser un texto complementario para las materias de Geotécnia IV para Ingeniéros Civiles y Mecánica de Rocas II para Ingeniéros Geólogos, en el cual se encuentre la aplicación de los conocimientos adquiridos, sobre estabilidad de taludes en un proyecto real.
- b) Presentar la importancia de la Geotécnia como un trabajo interdisciplinario, en donde la Ingeniería Geológica y la Civil tienen que apoyarse para lograr mejores resultados.
- c) Obtener resultados que definan de manera más precisa la geología y geometría de las áreas estudiadas, así como facilitar la determinación del factor de seguridad de las cuñas presentes apartir de diversas condiciones de subpresión y sismo.

CAPITULO II ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

El proyecto de Aguamilpa forma parte de un plan global de aprovechamiento hidroeléctrico del Río Santiago, cuyo estudio está siendo desarrollado por la C.F.E. Su finalidad principal es la producción de energía eléctrica, en operación conjunta con las otras plantas previstas a lo largo del río y con factores de planta bajos, para atender los picos de consumo.

El embalse Aguamilpa debe además amortiguar los picos de avenidas para proteger las obras de riego existentes aguas abajo y proteger la planicie costera.

El aprovechamiento permitirá la generación de energía eléctrica mediante la Planta Hidroeléctrica que alojará tres unidades de 320 MW cada una, con una generación media anual de 2 100 GWH.

2.1 Localización y Acceso a la Obra

El sitio previsto para las obras se encuentra en la porción central del Estado de Nayarit, al NNE de la ciudad de Tepic, sus coordenadas geográficas son: $21^{\circ}50' 17''$ latitud norte y $104^{\circ}48' 15''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich (fig. 2.1 a)

El acceso, partiendo de la ciudad de Tepic, se efectúa por la carretera estatal pavimentada que va a Francisco I. Madero, hasta la desviación hacia Aguamilpa en el kilómetro 12. Se continúa por el camino de terracería hasta el proyecto, con un desarrollo adicional de 40 km (fig. 2.1 b).

2.1.1 Características de la Cuenca del Río Santiago

La Cuenca del Río Santiago, ubicada en la región central de la vertiente del Pacífico, se localiza entre los meridianos 101°14' y 105°26' de longitud oeste y entre los paralelos 20°19' y 23°25' de latitud norte (fig. 2.2).

La cuenca total, desde el lago de Chapala hasta el último afluente abarca un área de 75, 574 km², dividida en las siguientes entidades federativas:

Jalisco	29 850
GuanaJuato	1 954
Aguascalientes	5 320
Zacatecas	23 589
Durango	4 039
Nayarit	10 814

	75 574 km ²

El río Santiago, desde su origen en el Lago de Chapala a 1 525 msnm, fluye en dirección general SE-NW relativamente próximo y paralelo al límite suroccidental al trazo de la carretera Guadalajara-Tepic.

La mayor parte de la cuenca se desarrolla al NE del río, por regiones montañosas (estribaciones meridionales de la Sierra Madre Occidental) y de acceso relativamente difícil. Por estas regiones escurren los afluentes principales del río (todos de margen derecha), desde aguas arriba: el Río Verde, Juchipila, Bolaños y Huaynamota. En correspondencia a la confluencia de este último el río Santiago cambia la dirección de su curso, dando vuelta hacia el W-SW, para llegar por fin al Océano Pacífico.

De acuerdo a los registros disponibles, el río Santiago en

Aguamilpa tiene dos períodos bien definidos, una época de sequía de Diciembre hasta Junio y una época de avenidas desde Julio hasta Noviembre. El régimen refleja las precipitaciones de la época, los picos de avenida son generalmente cortos en duración y muy altos en relación al gasto base del río; siendo un claro indicio de la poca permeabilidad de los terrenos de la cuenca y de la fuerte pendiente de los ríos.

El embalse se delimita por la elevación 227. Se extiende sobre el río Santiago hasta el P.H. Cajones y sobre el río Huaynamota hasta las inmediaciones del poblado del mismo nombre, abarca parte de los municipios de Tepic, Ruiz, El Nayar y Santa María del Oro (fig. 2.3).

La cuenca del río Santiago cuenta con un clima templado lluvioso para el área de la Sierra y Planicies Altas y tropical lluvioso en los Valles Intermontanos. El clima templado lluvioso se define con temperaturas de 0°C a 35°C y el tropical lluvioso con temperatura media superior a los 18°C .

Los datos climatológicos promedio registrados en la estación Despeñaderos, Nay. de la SARH Cañón de Aguamilpa son:

	máx	mín	prom
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	33	19	26
Evaporación (mm anual)	2 400	2 212	2 353
Precipitación (mm anual)	1 200	800	1 000

Tomando en cuenta la afectación por los usos futuros del río Lerma, Lago Chapala y río Verde, el escurrimiento medio anual en el sitio Aguamilpa se ha estimado en 6,736.4 millones de m^3 lo que representa un gasto medio anual de $213 \text{ m}^3/\text{s}$. La Cuenca del Río Santiago cuenta con 154 estaciones, lo que ha permitido considerar los datos de precipitación a fin de predecir avenidas.

2.2 Descripción del Proyecto

La construcción del proyecto está constituida principalmente por una cortina de enrocamiento con el paramento mojado formado por una losa de concreto, en margen izquierda dos túneles de desvío y obra de excedencias, y en margen derecha obra de generación subterránea.

El conocimiento de la geología aplicada a la ingeniería del sitio ha sido el resultado de levantamientos topográficos y geológicos, excavaciones subterráneas, perforaciones de diamante y track-drill, prospección geofísica y análisis de laboratorio. Estos estudios de exploración se iniciaron en octubre de 1979 (fig. 2.4).

2.2.1. Obras de desvío

La obra de desvío de margen izquierda corresponde a un par de túneles paralelos de 16 m de diámetro con un desarrollo de 850 m para el Túnel 1 y de 950 m para el túnel 2.

El túnel 1 es el más cercano al cauce, con una elevación de 64 m en su portal de entrada y de 63 m en su salida. El Túnel 2 se encuentra alojado más hacia el macizo rocoso con un portal de entrada a la elevación 69 m y la misma elevación de salida que el túnel 1.

Túnel 1

Los estudios geológicos del sitio donde será emplazado este portal indican que se trata de la roca más deteriorada físicamente, debido a que en esta zona convergen varios accidentes geológicos como son: una falla, la intrusión de más de dos diques de tipo básico, alteración hidrotermal, hematización e intemperismo. Durante la alteración, la segregación de sílice se concentró en un crestón que aflora en la superficie a lo largo de la traza de la falla. Sin embargo la roca mejora claramente hacia el encapille del túnel y a profundidad. La remoción del material comprenderá en la porción superior, la Unidad denominada Colorín y hacia el piso de la obra, la

Unidad Aguamilpa.

Junel 2

El portal de entrada, será labrado en la Unidad Colorín, la seudostratificación de esta roca muestra ligeros basculamientos que modifican suavemente la inclinación y su orientación regional, pero el bajo ángulo aparente de ésta con el rumbo de la obra, no presenta problemas de estabilidad o deslizamiento hacia el corte.

Durante la excavación se encontrará el contacto entre la Unidad Colorín y la Unidad Aguamilpa, por lo que se cortará el plano inclinado de la Falla Colorín 5, que afectará un tramo de unos 30 m, donde también hay diques inclinados, que con el plano de falla seguramente formarán cuñas inestables en el techo.

2.2.2 Obras de Contención

Cortina

El diseño de la cortina corresponde al tipo de enrocamiento, con paramento aguas arriba constituido por una membrana impermeable con galería perimetral integrada para inyección y drenaje. El desplante de la obra será exclusivamente sobre la Unidad Aguamilpa, lo que supone una respuesta elástica homogénea en la cimentación.

La existencia de diques, seminormales al cauce, contactos sellados y silificación general de la unidad rocosa encajonante, ayuda en parte a reducir las filtraciones tanto en el cauce como en ámbos márgenes, lo que se confirma con los bajos resultados de las pruebas de permeabilidad en el cruce de dique con la perforación ejecutada en el eje.

Para el desarrollo del diseño de la pantalla impermeable se requiere de más exploración detallada, para identificar accidentes geológicos como la discontinuidad del Templete, superficialmente cartografiada a la cota 235 y con continuidad interpretada en el

socavón 5; o como el posible alineamiento en el cauce.

Ataguías

La ataguía aguas arriba tiene una amplitud a lo largo del río de unos 200 m y con su corona a la elevación de 82 msnm. El espesor de acarrees alcanza hasta 20 m, disminuyendo hacia las margenes, las cuales están constituidas por roca de la Unidad Aguamilpa, intrusión en margen derecha por un dique granodiorítico de orientación NW-SE y unos 10 m de espesor. La margen izquierda muestra la presencia de un dique diabásico de dirección NE-SW de unos 2 m de espesor. Ambas intrusiones serán evidentes barreras que ayudarán a ser más impermeables las margenes del río, constituyendo apoyos al diseño de impermeabilización de la ataguía. La ataguía de aguas abajo con distribución longitudinal al río más reducida, de unos 10 m y elevación de la corona de 80 msnm, también será desplantada en la Unidad Aguamilpa. En este sitio, el río tiene un espesor mayor conocido, alcanzando 28 m hacia la porción derecha del cauce y con posibles hondonadas de unos 27 a 30 m de profundidad (rellenos de aluvión)

2.2.3. Obra de Generación

El arreglo de generación comprende una obra de toma con piso en la elevación 170, tres túneles de presión de 7 m de diámetro, caverna casa de maquinas con piso en la elevación 41 y 82.50 en bóveda, galería de oscilación al mismo piso 41, con bóveda a la 93.30 y túnel de desfogue de 16 X 16 m.

El esquema completo de obra de generación en margen derecha quedará alojado dentro de la Unidad Aguamilpa, excepto el corte de obra de toma que será en la Unidad Colorín.

En la barranca del Colorín se localiza la casa de máquinas subterránea y el macizo rocoso está afectado por el sistema de fallamiento colorines 1 a 4 cartografiado con orientación N 45° - 48° E

y N 63° E e inclinaciones de 65° en promedio al SE y además por un sistema de fallamiento secundario de orientación sensiblemente E-W y otro NW-SE.

Esta roca presenta intrusiones de diques de orientación N 15° - 50° W, uno de ellos granodiorítico y el resto de diabasa con distribución regular a la orientación de la barranca.

Las cavernas para casa de máquinas y galería de oscilación, tiene una orientación NNW en su eje mayor. Las direcciones principales de fallamiento (fallas Colorines 1 y 2) en esta margen los cortarían oblicua y perpendicularmente al eje mayor, por lo que es de esperarse la formación de cuñas importantes en la bóveda.

El comportamiento en los muros de las cavernas, se anticipa, con excepción de la cara noroeste, donde el buzamiento de los sistemas de fracturamiento de la margen derecha formarán cuñas hacia el SE.

La pseudoestratificación no se considera que represente riesgos importantes para la estabilidad de las excavaciones subterráneas en la Unidad Aguamilpa. A cielo abierto, la Unidad Colorín pseudoestratificada corresponde a planos de discontinuidad en el sentido estricto de la palabra, acentuándose en la porción superficial donde además se ve afectado por la erosión diferencial de los componentes del depósito ignimbritico y la decompresión.

En el caso de la excavación a cielo abierto de obra de toma, los taludes estarán gobernados por la orientación e inclinación de las discontinuidades dentro de la Unidad Colorín y hacia el piso en la Unidad Aguamilpa.

2.2.4 Obra de excedencias

La obra de excedencias, localizada en la margen izquierda comprende una excavación a cielo abierto con piso en la elevación 205,

para alojar el canal de llamada, que dará servicio a dos vertedores, en canal, ambos con cimacio a la cota 210. Los canales tiene una longitud de 443 m con pendiente de 12 por ciento y terminación en cresta de salto de esqui en la elevación 156.

La excavación del canal de llamada será practicada en la Unidad Colorín y un menor porcentaje en al Unidad Aguamilpa, cuyo contacto es por la falla colorines 5 (capitulo 4), que es el rasgo estructural mas importante del sitio. La traza de la falla cruza diagonalmete el eje del cimacio pero a la elevación de piso de compuertas, el plano de falla pasa aguas arriba del cimacio por lo que la estructura de la obra civil quedará cimentada totalmente en la Unidad Aguamilpa, de mejores características geomecánicas.

CAPITULO III GEOLOGIA

La forma topográfica de la boquilla, es en general simétrica, presenta en el segmento del cañón de Aguamilpa, un cauce con actitud rectilínea local de orientación N 80°E. La orientación del cauce obedece a una pendiente regional W, ocasionada por el basculamiento del paquete volcánico en esa dirección. El cauce puede asociarse a un lineamiento rectilíneo local paralelo a dicha pendiente regional y asociado a un sector semicircunferencial con centro en el Cerro de los Picachos.

Las laderas presentan en sus márgenes diferentes pendientes, margen izquierda 51 por ciento y margen derecha 46 por ciento. Las márgenes de la barranca, en forma de U abierta, alcanzan elevaciones del orden de 1200 a 1400 msnm.

3.1 Litología

El P.H. Aguamilpa está emplazado en un cuerpo de rocas ígneas ignimbríticas y derrames andesíticos del Oligoceno-Mioceno (35 m.a.) que forman la base de la secuencia y subyacen a tobas, derrames e ignimbritas dacíticas-riodacíticas del Mioceno. Estas rocas están cubiertas por tobas y derrames basálticos, ambos tipos de roca del Plioceno-Holoceno.

Este paquete de rocas se encuentra basculado hacia el Oeste, e intrusionado por numerosos diques de naturaleza diversa; granito calcoalcalino y monzonita como un solo intrusivo, emplazado durante el Mioceno Medio, diques pórfido andesíticos del Plioceno Temprano y diques diabásicos del Plioceno Medio y Pleistoceno. Se encuentran afectando la Unidad Aguamilpa y Colorines. La anchura promedio es de

2m y de longitudes que varían de 5 a 50m con tendencia a la verticalidad y orientación que coincide con el sistema de fracturamiento de orientación NNW (fig. 3.1)..

Cerca de la superficie, los diques diabásicos son susceptibles a intemperizarse, sin embargo a profundidad mejoran las condiciones físicas de la roca.

Se encuentran definidas las siguientes Unidades:

Unidad Aquamilpa (Tua)

Se compone de un grueso espesor de ignimbritas, con aspecto masivo y algunas zonas de pseudoestratificación (diferentes grados de soldamiento), es de color morado variando a gris claro por alteración hidrotermal.

Hacia la parte inferior de esta roca se observan gran cantidad de líticos de andesita hasta de 5 cm de grueso, en la parte superior los líticos disminuyen en cantidad y tamaño. Esta unidad ocupa la mayor parte de afloramientos en la margen izquierda. Se calcula un espesor mayor de 240m.

Por su mayor resistencia presenta acantilados quebrados y altos

Unidad Colarín (Tuc)

Tobas pseudoestratificadas con tobas rojas. Presentan graduación y selección de tamaños, los pseudoestratos son mas o menos uniformes de 10 a 20 cm, inclinados de 25° a 30° hacia el W-SW (aguas abajo). Esta unidad cambia transicionalmente hacia la cima a tobas rojas de textura arenosa, concordantes a las que contienen abundantes líticos y andesita.

Por sus capas de carácter un tanto arenoso y bien definidas dan una apariencia en la superficie, de rocas degradables con escalones y escarpes hacia el norte, abruptas y acantiladas hacia el oriente y

suaves quiebres del relieve el W y NW.

Unidad Picachos (Tup)

Lava, brecha y aglomerado, pseudoestratificadas color morada de composición traquiandesítica. Tiene pseudoestratificación con capas de 0.20 m en promedio, con echados hacia el W, se distribuyen hacia la parte alta de las dos márgenes .

Rocas Intrusivas

En esta área afloran rocas intrusivas hipabisales de composición monzonítica, andesítica, diabásica y granodiorítica, con una reducida exposición debido a que están cubiertos por suelos y depósitos de talud.

El sistema de fracturamiento NW es de carácter regional y es el más antiguo ya que en general los diques guardan este rumbo predominante.

Diques porfido andesíticos

De color verde a verde-gris, masivos y compactos, de textura porfirítica en matriz afanítica. Poco distribuidas en el área, topográficamente constituyen depresiones.

Presentan formas con tendencia tabular de actitud vertical y espesor promedio de 2.5 a 3.5 m. Son fácilmente afectados por el intemperismo. Sólo se encontró uno de estos diques en la boquilla, no fracturado y con sus contactos sellados.

Diques monzoníticos

De color verde-crema claro; masivos y duros de textura afanítica con escasos fenocristales. Se distribuyen en toda el área, su espesor promedio es de 3.5 m. Constituyen crestas tabulares de tendencia vertical y paredes en los cauces de los arroyos. Presentan un rumbo NNW-SSE predominantemente. Intrusionan a la ignimbrita dacítica y a su vez están instrusionados por diques diabásicos. Se presentan poco

intemperizados y fracturados e incipientemente propilitizados. Existen delgados planos de alteración en el emplazamiento de los diques. Edad del Mioceno tardío.

Diques diabásicos

De color verde oscuro a negro; masivos, duros y compactos, con textura afanítica. Se distribuyen con gran frecuencia en la boquilla intrusionando tanto en forma tabular con tendencia vertical, como muy irregular, con espesor promedio de 1.0 m, variando de 0.4 a 5.0 m, en la topografía conforman depresiones. Generalmente sanos o incipientemente propilitizados. Son los más jóvenes, del Mioceno-Pleistoceno.

Diques Granodioríticos

Se encuentran afectados generalmente por los diques diabásicos, en general los contactos con la roca son sellados.

Depositos de lahar

Depósitos de talud que ocupan la parte media de la ladera, constituido por brechas, aglomerados y lodos volcánicos, de composición andesítica, formada como corriente de lodo, parcialmente litificado y que cubre las unidades Aguamilpa y Colorín, con espesor variable de 1 a 20 m.

3.2. Alteraciones

De acuerdo a su importancia se tiene:

Silicificación

El fenómeno de hidrotermalismo, silicificó intensamente las zonas de falla, formando crestones de sílice, que afectan a las Unidades Aguamilpa y Colorines, con aporte de sulfuros de fierro (pirita disseminada).

La silicificación decolora la tonalidad de la roca a gris verdoso

claro, con halos de hematización con tonos oscuros. La roca se vuelve dura, compacta y densa en grandes porciones, pero no pierde su textura original excepto cuando forma crestones a lo largo de planos de falla o de fracturas. Es notable que la sílice secundaria arma la matriz cristalina de la roca, cementando los componentes de ésta y aumentando la rigidez y dureza de la roca, incrementando la homogeneidad a mayor profundidad.

Propilitización

Presentándose en zonas fracturadas o afalladas, con los minerales característicos, clorita, epidota, calcita y pirita. Existen vetillas de calcita observadas principalmente en socavones, relleno de fracturas o zonas trituradas de la roca, en ocasiones no la sellan completamente, sin embargo, mejoran la calidad del macizo rocoso.

Argilitización

Debido al intemperismo químico se encuentra distribuido en la zona, dando lugar a roca alterada con espesor variable de 1.5 a 3.0 m. Dentro de fracturas notables o pequeñas zonas muy fracturadas

3.3. Estructuras Geológicas

Las estructuras geológicas del área están representadas por tres tipos de discontinuidades; fallas, fracturamiento y pseudostratificación (fig.3.2).

Fallas

Son las estructuras más importantes identificadas en el área y en las cuales se identifica a el Sistema Colorín con orientación NE-SW e inclinaciones de 65° al SE. Las inclinaciones al SE en la margen derecha son cuatro, localizadas en el arroyo colorines y dos en la margen izquierda, todas denominadas Colorín del 1 al 6. En la margen izquierda aguas abajo de el eje de la cortina existe una falla con rumbo NW-SE, con buzamiento al SW y denominada Cajón.

Existen fallamientos de menor magnitud como los encontrados en la Barranca del Colorin en donde existen 2 fallas secundarias de orientación sensiblemente E-W y una NW-SE.

Entre los rasgos de menor magnitud sobresale la fractura del Templete, en algunas interpretaciones considerada como falla de orientación casi E-W; cuya traza se continúa en un tramo de 30 a 40 m y tiene inclinación de 65° al N. Se encuentra rellena por un dique básico, con alteración hidrotermal.

Fracturamiento

En general los sistemas de fracturamiento presentan continuidad horizontal, lo que puede asociarse a que el origen de este es esencialmente por enfriamiento.

La condición de densidad, alta dureza y compacidad, de la Unidad Aguamilpa provoca su elevada competencia y no acepta fuertes deformaciones. A través del camino de acceso y las obras de excavación se observa el fracturamiento en bloques de diferentes dimensiones y formas prismáticas.

Mediante análisis estereográfico y estadística de fracturas se concluye que existen los siguientes sistemas para cada margen (cap. IV):

Margen Izquierda

- I N 65° - 70° E / 65° - 90° SE
- II N 50° - 70° W / 50° - 85° NE
- III N 50° E / 77° NW
- IV E - W / 60° - 90° N
- V N - S / 65° - 90° E

Margen Derecha

- 1. N 15° - 35° E / 60° - 70° SE
- 2. N 50° - 70° E / 70° - 87° SE
- 3. N 30° - 60° W / 70° - 80° NE
- 4. N 25° - 45° E / 15° - 30° NW

Los sistemas primero y segundo de ambas margenes presentan mayor densidad, aún cuando no se puede señalar que son los más importantes

tectónicamente.

Seudoestratificación

El paquete volcánico se encuentra basculado hacia el W, regionalmente aparece con un rumbo general N 10°- 15°E e inclinación 20°- 30° al WSW.

Debido a la presencia de pequeñas fallas, la seudoestratificación presenta desplazamientos frecuentes de 20 a 50 cm y ocasionalmente de 2 a 10 m, que orientan inclinaciones con tendencia al NW más que al W, en ángulos hasta de 30°.

La seudoestratificación es más clara en las Unidades Colorín y Picacho, con espesores de 10 a 20 cm, que en la Unidad Aguamilpa, en donde algunas zonas presentan capas mal estratificadas y planos soldados y rugosos, de espesores entre 30 y 50cm.

3.4 Tectónica

El área de estudio se encuentra en el extremo suroeste de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y en la porción noroccidental del graben Tepic-Chapala (fig. 3.3).

La primera esta representada por rocas andesíticas y dacítico-riodacítico del Mioceno-Plioceno inferior, que cubrieron una paleotopografía cretácica afectada por batolitos graníticos (Mauvois, 1976). Su origen se asocia a una margen continental activa (Demant, 1975).

Las rocas ignimbríticas presentes resultan posiblemente de la fusión de la corteza, encima de las zonas donde se generan los magmas andesíticos o por diferenciación magmática de estos, considerando que las condiciones compresivas de la margen activa, no daban lugar a la salida franca del magma, hasta el hundimiento total de la placa Farallón en el manto, durante el Plioceno Temprano, cuando concluye

dicho fenómeno compresivo.

Ocurren movimientos distensivos asociados al sistema Golfo de California-Falla San Andrés y al cambio de orientación que sufrió la dorsal Pacífica Este (Plio Cuaternario) con lo que se formó el graben Tepic-Chapala por el hundimiento del bloque central de rumbo NW-SE y provocándose un cambio en la actividad magmática de calcoalcalina a alcalina de tipo basáltico (Demant, 1976) siendo sus principales focos eruptivos los volcanes, El Sanganguey, El Cebruco y El Tequila.

Las fracturas marginales de este sistema constituyen el contacto actual entre la Placa Americana y la Placa del Pacífico, presentando un rumbo NW-SE, que persiste a lo largo de la Sierra Madre Occidental.

Los rasgos morfológicos del Río Santiago tienden a ajustarse a este sistema de fracturamiento desde el Lago de Chapala al Sur, hasta su confluencia con el río Huaynamota por el Norte, donde cambia su rumbo al WSW. El río Santiago limita al graben Tepic-Chapala de la Sierra Madre Occidental.

Tomando en cuenta la distribución y extensión del delta del Río Santiago y la elevación y edad de las terrazas basálticas a lo largo del cauce, algunos autores definieron que el levantamiento de la corteza continental, iniciada desde el Cretácico, es superior al peneplaneamiento de la cuenca hidrológica con una velocidad de elevación de 300 m por millón de años (Damon, 1979).

3.5 Sismicidad

En función de las características geotécnicas de la República Mexicana las zonas continentales y marítimas se dividieron en provincias sísmicas.

La región en estudio se encuentra en la provincia Penisísmica, la cual se caracteriza por sismos ocasionales no mayores de 6° en la

escala de Richter, en donde los epicentros más cercanos se localizan a 200 km al W en el Océano Pacífico, (Esteve, 1975).

Durante el Oligoceno-Mioceno la región estuvo sometida a esfuerzos de compresión provocados por la subducción de la placa Farallón respecto a la placa Americana. En el Plioceno temprano se desarrolló una etapa distensiva en donde la región tuvo que haber sufrido una gran cantidad de sismos de magnitud considerable.

Hacia el Plioceno tardío-Pleistoceno, se alcanza el equilibrio, quedando liberadas las perturbaciones sísmicas.

CAPITULO IV. LITOLOGIA Y ESTRUCTURAS GEOLOGICAS EN EL VERTEDOR Y OBRA DE TOMA.

4.1. Margen Izquierda - Obra de excedencias

4.1.1 Litología

La obra que comprende el vertedor se extiende dentro de un área localizada entre las coordenadas W = 112 600 a 113 400 hasta la N = 103 200 a 102 900, siendo esta la que se considera para el análisis en la margen izquierda. Geológicamente el vertedor se ubicará dentro de las unidades: Aguamilpa, Colorin, y Picachos.

El reconocimiento geológico se ha hecho a través de: fotografías aéreas, un levantamiento superficial detallado sobre la traza de la cortina (la que previamente se ha limpiado), tendidos geofísicos, los arroyos que se encuentran comprendidos en esta área, sondeos de exploración (CD-5, CD-17, CD-19, CD-33, CD-49, CD-51, CD-53, CD-55, CD-61 y CD-63), y tres socavones (C-1, C-3 y C-5 en la Unidad Aguamilpa, fig.4.1).

La Unidad Aguamilpa

Constituida por una roca volcánica extrusiva (ignimbrita riocácitica), homogénea, de color violeta a gris claro, en algunas zonas afectada por la alteración hidrotermal, es compacta, masiva y de dureza alta en zonas silicificadas. Resultado de trabajos geofísicos en esta zona, han reportado la 1ra. capa de 10 m de espesor con velocidades de 600 m/s y bajo esta, otra de 10 m también con velocidad promedio de 2,500 m/s.

En ciertas zonas del talud derecho en el canal vertedor se encuentran zonas ligeramente argilitizadas por intemperismo (CD-19), así también se encuentran zonas de oxidación entre los 45 y 60 m de profundidad, no siendo ésta última un problema para la estabilidad ya que se encuentra alejada de la zona de la obra.

Esta ignimbrita presenta incipiente fluidez y la mayoría de sus fracturas se encuentran selladas por calcita.

Intrusionando a esta unidad se encuentran diques de diferente composición; monzoníticos, se presentan en la parte alta de la traza de la cortina, de color gris rosado, alabeados, con espesor de 2 a 3 m, compactos y poco alterados: sin embargo sus contactos se encuentran rellenos de arcilla y en sus vecindades un halo de alteración hidrotermal (oxidación, silicificación) se manifiesta también por una anomalía geofísica (baja resistiva) en esa zona; porfido andesíticos, se presentan de color verde, de formas irregulares, tabular y alabeados; tanto horizontal como verticalmente, tienden a converger a profundidad formando un tronco común (soneo CD-59), sus contactos son sellados, presentan solo una costra de intemperismo; diabásicos, afloran en la parte alta de la traza de la cortina, son tabulares, angostos, raramente alcanzan los 2 m, tienen poca continuidad en sus afloramientos, forman parte de desprendimientos de un tronco común a profundidad (sondeo CD-59), de color negro a café ocre, superficialmente se presentan muy alterados (argilitizados), pero a profundidad mejoran notablemente, donde sus contactos son sellados en ocasiones por calcita (CD-17).

La Unidad Colón

Caracterizada por tobas liticas alternantes con zonas silicificadas y arenosas, en ocasiones con pirita diseminada y minerales de propilitización, muy fracturadas e intemperizadas, a profundidad existe una mejoría en la roca lo que se denota por una

mejor recuperación en los barrenos y en muestras menos alteradas.

Se encuentra intrusionada por diques diabásicos, diques monzoníticos con orientación NW y algunos diques pórfido andesíticos. Topográficamente ocupa un área muy extensa hacia el W de la margen desde la cota 50 hasta la 300 y hacia el E se extiende de manera similar.

Unidad Picachos

Se localiza en la parte superior tanto topográfica como estratigráficamente, (cota 275). Se presenta como una andesita compacta, color violacea a crema por alteración, de dureza alta, con fenocristales de feldespatos, poco fracturada y afectada por soluciones mineralizantes. En su parte superior se encuentra como una brecha o aglomerado mineralizado con matriz afanítica y con diseeminación de sulfuros. Existen vetillas de calcita y cuarzo, las fracturas observadas se encuentran rellenas de oxido de Fe, pirolusita o minerales de propilitización.

Se encuentra intrusionada por diques monzoníticos y diabásicos.

4.1.2 Estructuras

Fallas

La orientación de la falla Colorines # 6, es en promedio NE 50°/70°SE. Pone en contacto la Unidad Picachos con la Unidad Colorines, sus condiciones son favorables ya que se presenta como una zona altamente fracturada pero con crestones de sílice que la confoman como una estructura sólida. Presenta una longitud cartografiada dentro de esta área de 230 m. Intersecta al talud izquierdo del canal de llamada

Colorines # 5, con un rumbo NE 60° y con inclinación variable de 60° a 75° hacia el SE, cubre toda el área en estudio y en su parte baja

topográficamente ponen en contacto la Unidad Colorines y la Unidad Aguamilpa a un mismo nivel topográfico aproximadamente hasta la cota 270 donde pone en contacto la unidad Picachos y Colorines. En superficie se observan crestones de sílice, el salto es desconocido pero por correlación obtenida con los barrenos se puede observar que es de por lo menos 60 m. Aparece sobre el talud izquierdo del canal de llamada

Falla Cajones, con orientación NW/SW se localiza en la unidad Colorín, su expresión morfológica es muy pequeña. Intersecta el talud derecho del canal Vertedor (figs. 4.2 a), b), c) y d)).

Fracturas

La exploración realizada en margen izquierda se apoya fundamentalmente en los socavones (C-1, C-3 y C-5) y la traza de la cortina; en la margen se realizaron caminamientos sobre los arroyos, así como en el corte del camino de acceso al proyecto y el banco de voladuras.

El fracturamiento definido en la U. Aguamilpa es:

NW 79° / 84° NE
 NW 14° / 76° NE (diques)
 NE 50° / 77° SE (fallamiento gral.)
 NE 28° / 76° NW

En U. Colorín:

NW 20° / 80° SW (diques)
 NW 80° / 65° SW
 NW 63° / 65° NE
 NE 10° / 75° NW

En la U. Picachos no fué posible realizar un análisis de fracturamiento, el acceso al que se tiene es solamente en su parte

superior (brecha) y no presenta una estructura clara.

En general la margen izquierda puede englobar un conjunto de familias de discontinuidades que son representativos de su comportamiento estructural:

$N 60^{\circ} - 70^{\circ} E / 65^{\circ} - 90^{\circ} SE$
 $N 50^{\circ} - 70^{\circ} W / 50^{\circ} - 85^{\circ} NE$
 $N 50^{\circ} E / 77^{\circ} NW$
 $E - W / 60^{\circ} - 90^{\circ} N$
 $N - S / 65^{\circ} - 90^{\circ} E$

Se observa en los socavones que existen fracturas relevantes que ocurren con una frecuencia de 10 a 15 por cada 100 m y están rellenas de arcilla de origen hidroterma' con fragmentos de roca, con espesor de 1.0 cm a 5.0 cm y ocasionalmente hasta 10 cm con inclinación promedio de 60° a 85° , de tendencia tangencial o paralela al cauce del río. Se encuentran otras fracturas con el mismo rumbo predominante, de espesor menor a 1.0 cm y rellenas de calcita o arcilla, formando grupos o familias de fracturas que se extienden durante decenas de metros, aunque individualmente no conserven el mismo espesor y actitud, pues tienden a variar su rumbo de inclinación.

Existen estructuras de decompresión con inclinación hacia el cauce del río (25° a 45°) hasta la profundidad de 15 a 30 m, respecto al perfil del terreno.

4.1.3 Integración Geológica Geofísica

La información geofísica indica que los primeros 6 m de la roca es de mala calidad por decompresión. Esta característica varía gradualmente entre una profundidad variable de 4 a 20 m, con velocidades promedio de 2 500 m/s. Por debajo de este espesor la roca mejora detectándose velocidades sísmicas compresionales de 4 000 m/s.

Dentro de la capa de alta velocidad también se registraron altas resistividades, de 4 000 a 3 900 ohms - m, excepto en dos zonas de baja resistividad que corresponden a alteración de la roca, generada por las soluciones hidrotermales que acompañan a los diques monzoníticos. Se observan además 3 discontinuidades sísmicas bajo el talud, que corresponden a diques de acuerdo al sondeo CD-59 y a otros diques cubiertos por talud bajo el camino.

4.2 Margen Derecha

4.2.1 Litología

La construcción de obra de toma queda comprendida entre las coordenadas W = 112 600 a 113 000 y N = 104 000 a 103 700, área en la que se han desarrollado dos barrenos (CD-26 y CD-6) y cortes con tractor a través de las cotas 300 y 325. Esta es la exploración más directa que se tiene de la margen para definir las condiciones litológicas y geológico-estructurales que se pueden presentar durante la excavación del talud derecho (155 m) e izquierdo (65 m) de la obra de toma.

Esta información se apoya con la obtenida en los socavones C-2, C-4 y C-6 en el eje de la cortina, C-8 socavón exploratorio para la casa de máquinas y la limpa de la traza de la cortina.

Los cortes de la obra de toma quedarán comprendidos en las tres unidades litológicas, teniendo el contacto entre las Unidades Aguamilpa y Colorín en la cota 195 y de Colorín con Picachos entre 250 y 300, aproximadamente (fig. 4.3 y 4.4).

La Unidad Aguamilpa

Se presenta como una roca intemperizada de color gris claro, compacta y frecuentemente fracturada, en zonas de menor grado de intemperismo su coloración es rojiza y en general la dureza es alta.

La Unidad Colorín

Como se mencionó antes, aflora a partir de la cota 195, en contacto concordante con la Unidad Aguamilpa, arriba de la zona de contacto ,se presenta muy fracturada, formada por pseudoestratos pequeños, no mayores de 15 cm. La orientación de estas capas es N 42°E / NW 15°, la dirección de su buzamiento coincide con la que regionalmente presenta la secuencia volcánoclastica de esta zona. En un recorrido ascendente se observa que la roca mejora sus condiciones teniendo estratos con espesores de hasta 2 m. La alta dureza y compacidad de la roca se manifiesta en los pseudoestratos más potentes. El macizo rocoso se presenta como una toba litica con fenocristales de plagioclasas disminuyendo la abundancia de éstos hasta pasar a una textura afanítica de coloración verde oscuro. En algunos tramos se presenta de color gris claro con tonalidades verdosas debido a minerales de propilitización que se incrementan de manera descendente, además de contener diseminación de pirita (sondeo CD-26).

La Unidad Picacho

Se describe a través de los cortes en las cotas 325 y 300. Es de color violáceo, no presenta liticos, de matriz arcillosa y con fenocristales de feldespatos, (composición traquiandesítica). En esta área existen dos expresiones muy claras en la roca, la primera es masiva con fracturamiento sistemático, la segunda también masiva muy resistente, con fracturamiento disperso y muy corto, en ocasiones con superficies circulares que definen estructuras esféricas de grandes dimensiones (4 - 5 m de diámetro) se presentan vacuolas orientadas en direcciones del flujo insinuando bandas de fluidéz con inclinación de 60°.

Dentro de esta unidad se encuentran diferentes diques intrusionando la roca; diques diabásicos, en general muy alterados de color amarillo-café a amarillo-naranja con espesores de 1 a 2 m , sin embargo se considera que a profundidad mejoran sus condiciones (se

han observado en los socavones y en los cortes del camino de acceso al proyecto); un dique pórvido andesítico, en sus bordes presenta una composición diabásica muy alterada y un dique monzonítico alabeado que en su contacto con la roca se presenta cerrado (cota 325) y en la cota 300 se encuentra asociado a un dique diabásico que parece acufarse, por lo que no aflora en la cota superior.

Alteración

Existe en esta margen una zona de alteración argílica, localizada entre las cotas 90 y 105, que se extiende lateralmente 70 m a partir del Arroyo Clavelina. En la limpia de la zona de la traza se detectó material arcilloso al parecer distribuido superficialmente, ya que con la correlación de núcleos del sondeo CD-22 de este tramo de la traza se observó que no tiene extensión vertical y a profundidad debe estar restringida a planos de fracturas que sirvieron de conducto ya que la roca es dura, compacta y bien silicificada.

Existe oxidación en zonas aisladas en la cota 125, de color amarillo ocre, no presentan extensión lateral importante.

4.2.2 Estructuras

Las estructuras más importantes en esta margen son : el sistema de fallas colorines (c-#1, c-#2, c-#3 y c-#4), el fracturamiento local, la pseudoestratificación y los diques que se encuentran en el área.

Fallas

Las fallas colorines 3 y 4 se observan en el arroyo Colorin como zonas muy fracturadas de unos 3 a 4 m de espesor y que se expresan fisiográficamente como arroyos continuos que atraviesan de forma oblicua el arroyo el Colorin y al arroyo paralelo aguas abajo, sin embargo, el definir las como fallas no ha sido muy claro e incluso su

expresión no se encontró dentro del socavón C-8.

La falla colorines 2 se presenta como una pared de 4 a 6 m de altura, con planos lisos y un crestón de sílice. Su estructura es muy clara en el arroyo el Colorín, sin embargo no se ha localizado en los cortes realizados en las cotas 325 y 300, por lo que no es conveniente prolongarla hasta la obra de toma.

La falla colorines 1 no se ha localizado dentro del área de interés su identificación se realizó a través de fotografías aéreas.

Se han realizado análisis geomorfológicos para detectar las estructuras que pudieran encontrarse, sin embargo éstas son las estructuras mayores localizadas en el área (más cercana a la obra), aún cuando no se descarta la posibilidad de que existan estructuras muy locales, que no tengan una expresión franca en el terreno y que por sus características heterogeneas no puedan ser detectadas de manera anticipada.

Pseudoestratificación

La pseudoestratificación la presentan unicamente la U. Colorin y la U. Picachos, se ha considerado como discontinuidad por formar planos persistentes con espesores que varían principalmente entre 15 y 30 cm y que en ocasiones se encuentran rellenos por arcilla .

Diques

Como se ha descrito, se encuentran principalmente diques de composición diabásica muy alterados en superficie y que mejoran sus condiciones a profundidad como lo revelan los sondeos y los socavones, diques monzoníticos, cuya estructura es muy bien definida por la resistencia que presentan a la erosión, en ambos casos siguen la orientación del fracturamiento NW con buzamiento SW-NE y en ocasiones casi verticales , son de gran longitud por lo que la mayoría de los

casos cruzan casi toda la margen.

Se encontró un dique porfidoandesítico con sus extremos de composición diabásica muy alterados y que parece no tener mucha continuidad como se ha observado con otros diques similares a través de ambas margenes.

Fracturas

El fracturamiento queda definido con las discontinuidades descritas anteriormente, agrupándolas en familias por ser estructuras que poseen cierta continuidad y persistencia, así quedan incluidas: las fracturas que se encuentran rellenas por diques, la estratificación, el sistema de fracturas que constituye un reflejo del fallamiento principal en el área y el fracturamiento propio del macizo rocoso. En cuanto a este punto se pueden señalar dos aspectos: el fracturamiento local definido en cada unidad litológica o bien el fracturamiento general que persiste en toda la margen en el área de interés.

La descripción de cada unidad litológica corresponde a los análisis realizados con la exploración disponible. En el caso de la U. Aguamlipa tenemos los socavones (C-2, C-4 y C-6) así como la traza de la cortina y el arroyo el Colorín. Se define el fracturamiento siguiente:

NW 30° / 80° NE (diques)
 NE 20° / 75° SE
 NE 50° / 75° SE
 E-W / 75° N

El fracturamiento principal corresponde a los dos primeros sistemas, en ocasiones se presentan discontinuidades con orientación E-W o N-S (muy esporádicos) que no constituyen familias.

En la U. Colorín se tiene muy poca información del fracturamiento, los levantamientos se han realizado a través de los arroyos, de los cuales se pueden definir:

NW 66° / 60° SW (diques)
 NE 17° / 55° SE
 NE 42° / 15° NW (estratificación)
 NE 45° / 60° SE

En U. Picachos se obtuvo información a través de los cortes realizados en las cotas 325 y 300 :

NW 40° / 75° NE (diques)
 NE 30° / 65° SE
 NE 60° / 80° SE
 NW 20° / SW 28° (estratificación)

En cuanto al fracturamiento general se tienen análisis estereográficos que de acuerdo a la dispersión que presentan los sistemas, la margen en el área de la obra presenta un fracturamiento preferencial de:

NE 15° - 35° / 60° - 70° SE (fallamiento gral.)
 NE 50° - 70° / 70° - 87° SE
 NW 30° - 60° / 70° - 80° NE (diques)
 NE 25° - 45° / 15° - 30° NW (estratificación)

4.2. Integración geológica geofísica

La información geofísica indica que en los primeros 6 m de la Unidad Colorín, la roca es de mala calidad por decompresión. Los siguientes 15 m corresponden a roca de regular calidad, y por debajo de estos espesores se registró la capa de altas velocidades que presenta una bolsa de alteración, la cual profundiza en la Unidad Aguamilpa, dentro de esta capa se detectaron zonas de baja

resistividad entre las cotas 110 y 140, 145 y 155 y 205 y 220.

La anomalía geofísica delimitada entre las cotas 110 y 140 y que alcanzan una profundidad de 40 m tienen una respuesta a las fracturas importantes en superficie (orientación N-S y E-W). Los planos en dichas fracturas están alterados y rellenos por material arcilloso y óxidos de hierro. El sondeo CD-22 cortó esta anomalía manifestándose como una zona de fracturas rellenas de arcilla y con baja recuperación.

En cuanto a las anomalías registradas entre las elevaciones 145 y 155 m y que se profundiza hasta 50 m puede ser producto de la fractura que tiene una orientación de N 20°E y espesor de 50 cm que varía a lo largo de su rumbo.

La anomalía registrada entre la elevación 205 a 220 m y que se profundiza hasta 90 m, no se observó ninguna respuesta en superficie pero es de esperarse que esté relacionada con el fracturamiento, zonas alteradas o bien a la influencia de un cuerpo intrusivo cercano que no aflora.

4.3 Conclusiones

La condición estructural a la que se ven sometidas ambas margenes corresponden a un sistema de fracturamiento general de orientaciones NW 50°- 75°, NE 30°- 40°, NE 50°- 70°, N-S y E-W fracturamiento que podrá definir las condiciones de esfuerzo a las que han estado expuestas las margenes.

De manera general se pueden resumir los aspectos estructurales relevantes de la manera siguiente:

- Existen rellenos arcillosos con espesores de 2.5 a 5 cm. Esto no involucra un solo sistema de fracturamiento.

- El fracturamiento no tiene espaciamientos constantes entre las familias, tampoco se presenta una geometría sistemática en el macizo rocoso.
- La densidad del fracturamiento aumenta con análisis refinados
- En tramos profundos el comportamiento estructural es más constante ya que existen zonas de decompresión que abarcan 15 m de profundidad.
- Los sistemas de fracturamiento son más persistentes en franjas horizontales, la continuidad se pierde en sentido vertical lo que se ha observado por los socavones y los cortes en margen derecha.

Piezometría

Se observaron altos niveles piezométricos en los meses de Septiembre y Enero con tendencia al abatimiento hacia Junio. En las configuraciones típicas de los meses de Mayo y Septiembre el comportamiento de la capa freática presenta congruencia con la topografía del área, observándose una pendiente de 20° del manto freático en margen derecha y de 24° en la margen izquierda. Esto confirma la baja permeabilidad del macizo rocoso en general.

CAPITULO V PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS

5.1 Margen izquierda

Comportamiento del macizo rocosa

El área que corresponde a ignimbritas dacítico - riódacíticas de tipo pseudoestratificadas, se encuentran instrusionadas por abundantes diques diabásicos, monzoníticos y andesíticos. Los afloramientos de roca se encuentran parcialmente cubiertos por suelos, aluvión o depósitos de talud. Los diques son de buena calidad, resistentes, impermeables de forma tabular semivertical, sus contactos por lo general son sellados y geofísicamente responden a velocidades altas y resistividades variables según su composición mineralógica.

Se realizó un resumen de los promedios de recuperación e índice de calidad de roca (RQD) de algunos sondeos realizados en esta margen, y se obtuvo un valor de RQD 49 por ciento promedio, el cual no es muy representativo puesto que la mayoría de los sondeos son de muy poca profundidad y otros estudios reportan buena calidad de roca (recuperación 86 por ciento y $v_i = 3,500$ m/seg). En cuanto al estudio realizado sobre la traza, la roca después de 6 m es de regular a buena calidad, con recuperaciones mayores de 90 por ciento y un RQD promedio superior a 70 por ciento.

El espaciamiento entre fracturas es cerrado a muy cerrado, con juntas a cada 4 - 6 cm en promedio y a cada 2 - 3 cm en las zonas muy fracturadas (CD-9). En superficie la generalidad del fracturamiento es de 15 a 30 cm.

La permeabilidad se considera baja o impermeable a pocos metros

de la superficie y a profundidad. Las permeabilidades altas se restringen a profundidades de 40 m, generalmente asociadas con fracturas, las cuales pueden ser inyectadas. Sobre la traza de la cortina la permeabilidad es secundaria, debido al fracturamiento principalmente afectado por hidrotermalismo, en la parte alta de la boquilla llega a 32 m de profundidad con valores de 16 a 19 U.L., (sondeo CD-57). Esta alta permeabilidad se debe al fracturamiento E-W y a la alteración hidrotermal en los alrededores de los diques monzoníticos. La zona poco permeable, con valores de 6 a 11 U.L. está de los 32 a los 42 m y de ahí en adelante se encuentra impermeable. En la parte baja de la boquilla la zona impermeable comienza desde los 5 m, con algunas zonas poco permeables a profundidad, a consecuencia de fracturamiento y alteración hidrotermal

La profundidad de los niveles freáticos aumenta hasta 40 m en las elevaciones altas, manteniendo un promedio de 25 m en el apoyo izquierdo de la cortina

5.2 Margen Derecha

Comportamiento del Macizo Rocoso

El área constituida por ignimbrita dacítico - riódacítica es compacta de buena calidad, se encuentra intrusonada por diques diabásicos y monzoníticos generalmente de forma tabular, los cuales presentan paredes con contactos cerrados, su rumbo predominante es NW-SE.

En resumen los datos de campo concluyen que el macizo rocoso forma bloques de roca de tipo tabular delimitados por dos sistemas de fracturas y con intemperismo moderado a poco, la calidad de la roca determinada por promedios es de RQD = 62 por ciento y recuperación 91 por ciento. La resistencia a la compresión asumida en el campo, es mayor de 500 Kg/cm^2 , así como permeabilidad en tramos profundos es de 2 U.L. y en tramos superficiales de 25 U.L..

De acuerdo con la información proporcionada por los sondeos CD-22 y CD-24, : los primeros 10 m representan la zona decomprimida, roca fraturada e intemperizada con valores de recuperación que van de 0 al 50 por ciento y un RQD menor del 50 por ciento con permeabilidades altas (20 U.L.). De 10 a 20 m mejora notablemente la calidad de la roca, sin embargo la permeabilidad continúa alta, así tenemos un promedio de recuperación de 80 por ciento y un RQD de 70 por ciento con valores de permeabilidad entre 15 y 20 U.L. estas permeabilidades altas sin duda se deben al fracturamiento afectado por alteración hidrotermal.

La zona de mejor calidad e impermeable comienza a partir de los 35 m, con alta recuperación (98 por ciento), un RQD de 80 por ciento y una permeabilidad baja que pocas veces alcanza las 6 U.L.

El espaciamiento en el fracturamiento es del orden de 15 cm en promedio; en los primeros 100 m las fracturas se encuentran aún más aisladas, a cada 30 cm más o menos; de 100 a 170 m el fracturamiento aumenta con fracturas a cada 6 - 12 m (CD-4). En superficie el fracturamiento se presenta frecuentemente entre 15 y 40 cm.

5.3 Propiedades mecánicas

Pruebas de laboratorio

A través de las muestras recuperadas por los barrenos se han hecho pruebas en laboratorio cuyos resultados son un reflejo de las características de la roca intacta más no de la masa rocosa, ya que el comportamiento de ésta está gobernado por las discontinuidades presentes en el área.

Estas pruebas se realizaron primeramente en tres barrenos CD-4, (margen derecha), CD-9 (margen izquierda) y CBR-1 (cauce). En estos se atraviesa una toba brechoide riolítica de color violeta

principalmente, en algunos tramos de color rosa oscuro y en otros gris claro (U. Aguamilpa), se encuentra intrusionada por diques diabásicos aislados de hasta 3 m de espesor.

En cuanto a la permeabilidad de la toba, determinada mediante pruebas Lugeon, se encuentra que la roca es impermeable en ambos márgenes, excepto en los primeros 15 m, donde la roca está decomprimida y la permeabilidad es del orden de 18 U.L.

Se realizaron pruebas de compresión simple con determinación del módulo de deformación, definido como el módulo secante al 50 por ciento del esfuerzo de falla; a esas mismas muestras se les determinó el peso volumétrico y el contenido de agua. Se hicieron pruebas de índice de alteración, porosidad, ensayos de resistencia a la tensión, flexión, de resistencia al corte simple y compresión triaxial.

Las propiedades promedio se presentan en la Tabla 1. Con base a esta información se puede decir que la calidad de la roca intacta de los dos márgenes es prácticamente la misma, la roca de mejores características geomecánicas es la que se encontró en el cauce (CBR-1). Sin embargo, como macizo rocoso, en esta zona se encuentra el mayor grado de fracturamiento y consecuentemente permeabilidades muy altas.

Así también, se tienen resultados de las pruebas de laboratorio realizadas con núcleos de roca del barreno CD-51 ubicado en la margen izquierda, en el canal de descarga del vertedor.

El barreno atraviesa las unidades Colorín y Aguamilpa, en el que su contacto se presenta transicional y aproximadamente a los 58 m de profundidad. Ambas unidades están constituidas por tobas brechoides riolíticas de color violeta principalmente, diferenciándose entre sí por su depositación. La U. Colorín es seudoestratificada, al contrario de la U. Aguamilpa, que presenta macroestructura masiva.

Con los núcleos de roca se efectuaron pruebas índice y mecánicas, las primeras consistentes en: porosidad, peso volumétrico (saturadas y no saturadas) e índice de alteración y de las segundas: compresión simple con determinación de módulo de deformación definido como el módulo secante al 50 por ciento del esfuerzo de falla, resistencia a la tensión directa, resistencia al corte doble, resistencia a la flexión y compresión triaxial. De éstas últimas se realizaron ensayos con muestras saturadas y no saturadas.

Los resultados se presentan en forma general en la Tabla 2.

Pruebas in situ

Se realizaron pruebas en el socavón 8-C (margen derecha) de: Placa flexible, pruebas de roseta y pruebas de gato plano.

Placa flexible

Su objetivo es la determinación de la deformabilidad en el macizo rocoso. Las pruebas se realizaron horizontales (paralelas y perpendiculares al río) y verticales.

El módulo de deformabilidad se obtuvo mediante la expresión siguiente derivada de la teoría de Boussinesq para un medio semi infinito (Tabla 3):

$$E = \frac{P}{\delta z} \left\{ [(1+\nu)z] \left[\frac{1}{(a_1^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{1}{(a_2^2 + z^2)^{1/2}} \right] + 2(1-\nu^2) \left[(a_2^2 + z^2)^{1/2} - (a_1^2 + z^2)^{1/2} \right] \right\}$$

E - módulo de deformabilidad (Kg / cm²)

P - presión de contacto (Kg / cm²)

a₂ - radio de la placa (54.5 cm)

a₁ - radio del orificio central (13.5 cm)

- z - profundidad del punto de medición (40 cm)
- δ_z - desplazamiento a la profundidad z (cm)
- ν - relación de Poisson (0.25 ensaye dinámico)

Prueba de roseta de deformaciones.

Teniendo como objetivo: la determinación de la dirección de las deformaciones principales en el macizo rocoso, fijar la posición de los gatos planos según la dirección de las deformaciones principales y calcular en forma indirecta los esfuerzos principales.

La prueba de roseta consiste en medir las deformaciones internas del macizo rocoso en tres direcciones diametrales que forman un ángulo de 60° entre sí, en un prisma que queda aislado del resto del macizo al barrenar una ranura de forma cilíndrica de 30 cm de diámetro y 30 cm de profundidad.

La dirección de las deformaciones principales resultaron de manera gráfica (circulo de Mohr para un estado plano de deformaciones). Los esfuerzos principales se obtuvieron mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 + \nu^2} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 + \nu^2} (\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$$

σ_1 - esfuerzo principal mayor

σ_2 - esfuerzo principal menor

E - módulo de deformabilidad de descarga (del macizo rocoso)

ν - módulo de Poisson

ϵ_1 - deformación unitaria en la dirección σ_1

ϵ_2 - deformación unitaria en la dirección σ_2

Los esfuerzos principales no corresponden al estado natural de esfuerzos sino al estado modificado por la excavación (Tabla 4).

Pruebas de gato plano

Con éstas se determina la magnitud de los esfuerzos principales en el macizo rocoso. Los esfuerzos medidos corresponden al estado de esfuerzos modificado por la presencia de la excavación. Además se puede obtener el módulo de deformabilidad de la roca.

Para determinar el esfuerzo normal en la prueba de gato plano se empleó la siguiente expresión (Tabla 5):

$$\sigma_n = \frac{P_c (c_j - d)}{c}$$

σ_n - esfuerzo normal, perpendicular al gato plano (Kg/cm^2)

P_c - presión de cancelación (Kg/cm^2)

$2c_j$ - longitud del gato plano (cm)

$2c$ - longitud de la ranura (cm)

d - distancia entre la ranura y el gato (cm)

Para el cálculo de la deformabilidad a partir del gato plano se utilizó la siguiente ecuación, que dá los desplazamientos que se presentan sobre las caras de una ranura delgada:

$$W_j = \frac{1}{E} [F_1 (S_c - 2 \nu S y_o \{ 1 - \frac{Q}{S} \})]$$

donde :

$$F_1 = [(1-\nu) \left(1 + \frac{y^2}{c^2} \right)^{1/2} - \frac{y}{c} + (1 + \nu) \left(1 + \frac{y^2}{c^2} \right)^{-1/2}]$$

W_j - desplazamiento del punto de referencia (cm)

S - esfuerzo normal al plano de la ranura (kg/cm^2)

y - distancia del punto de referencia al eje mayor de la ranura (cm)

$2c$ - longitud de la ranura (cm)

$2y_o$ - ancho de la ranura (cm)

Q - esfuerzo perpendicular a S

En la Tabla 6 se muestran los resultados del módulo de deformabilidad con módulo de Poisson de $\nu = 0.25$.

Interpretación de resultados

Placa flexible

En el levantamiento geológico del socavón 8-C en la zona de pruebas se indica un predominio del sistema de fracturamiento N-S con echado al E. Lo anterior se refleja en los módulos de deformabilidad medidos en sentido perpendicular al río (N-S) cuyos valores fueron más altos que los obtenidos en dirección paralela al río. (E-W), (Tabla 7).

Roseta de deformaciones

Los esfuerzos principales máximos calculados a partir de las deformaciones instantáneas medidas en las pruebas de roseta son del orden de 1.5 a 9 veces mayores a los esfuerzos internos en el macizo rocoso si únicamente se toma en cuenta su peso propio, o bien se incluye un esfuerzo tectónico horizontal en dirección E-W hasta de 40 kg/cm^2 (existe discrepancia por el procedimiento de ejecución de la ranura).

Gato plano

Los valores de los esfuerzos medidos en los ensayos de gato plano se presentan en la Tabla 5. En la misma tabla se muestra una estimación de los esfuerzos internos que se producen en una masa de roca por efecto de su peso propio ($\sigma_{tec} = 0$) y los esfuerzos que se generan al introducir un empuje horizontal en la dirección E-W que varía de $\sigma_{tec} = 20 \text{ kg/cm}^2$ hasta $\sigma_{tec} = 80 \text{ kg/cm}^2$. Estos esfuerzos se calcularon en base de la teoría de la elasticidad para la determinación de los esfuerzos circunferenciales en la superficie de un túnel circular.

Los resultados indican que los esfuerzos calculados y los esfuerzos medidos con gato plano son comparables dentro del intervalo

que varía desde los esfuerzos que incluyen el peso propio más un esfuerzo tectónico de 40 kg/cm^2 (Tabla 8).

No es posible precisar el estado de esfuerzos en el cual se encuentra el macizo dentro del intervalo mencionado anteriormente, debido a la variación de los valores de los esfuerzos medidos, variación que es reflejo de la heterogeneidad de la geología en el sitio.

CAPITULO VI ANALISIS DE ESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE VERTEDOR Y OBRA DE TOMA

Los análisis realizados están divididos en dos partes, un análisis estereográfico y uno vectorial. En el primero se definen las cuñas potencialmente deslizables através de una red estereográfica de igual ángulo teniendo como datos las familias de fracturamiento obtenidas en el capítulo IV y la dirección de los cortes en ambas margenes. En la segunda parte se determina la geometría de las cuñas mediante los ángulos β y γ , que se definen por la relación del rumbo y el echado de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud, así también se toma en cuenta la topografía del terreno mediante un ángulo denominado δ .

Finalmente se hace un análisis paramétrico en el que se establece un rango de variación para el ángulo de fricción en los planos de las discontinuidades (en la mayoría de los casos de 0° a 80°) y se obtiene el factor de seguridad haciendo variar las condiciones de presión hidrostática y sismo a las que pueden quedar sometidas las cuñas. En todo el análisis el peso de la cuña (W) se considera como unitario.

6.1 Análisis Estereográfico

Teniendo definidas las familias de discontinuidades en cada una de las margenes y las condiciones generales del macizo rocoso, se procedió a establecer las cuñas potencialmente deslizables, que en combinación con las direcciones y echados de los taludes en los cortes correspondientes a cada margen puedan deslizarse ya sea por propio peso o bien por quedar sometidas a fuerzas hidrostáticas y de sismo que ocasionen la disminución del factor de seguridad.

A partir del método estereográfico se definieron los polos de las

familias de discontinuidades en cada una de las margenes. Con la dirección y echado de los cortes se obtuvieron las familias que al combinarse entre sí forman cuñas inestables en los cortes (fig. 6.1 a 6.7).

En margen izquierda la topografía presenta una pendiente de 45° y en ella los cortes del vertedor tendrán taludes de 75° con una orientación en su mayor parte E-W y en su parte curva con una dirección que varía de E-W hasta $NE30^\circ$ en el talud sur y hasta 41° en el talud N.

En esta margen se obtuvieron 13 posibles cuñas (Tabla 6.1), en las que se analiza los sistemas de discontinuidades que las forman y la relación de la línea de intersección con el talud, de esto se tienen los siguientes resultados:

- 3 cuñas poseen un sistema de fracturamiento paralelo al talud, lo que requeriría de otra familia de fracturas para que el deslizamiento se llevara a cabo.
- otras 3 cuñas tienen en su línea de intersección (L.I.) un echado mayor al del talud lo que las hace clavarse antes de intersectar al talud.
- una cuña no tiene movimiento cinemáticamente posible (Tabla 6.2).

De las 6 cuñas restantes las definidas como DD y EE son iguales ya que los planos que las forman son los mismos, solo que la primera se encuentra intersectada por el talud mayor del vertedor y la segunda por el talud menor en diferentes direcciones.

En margen Derecha se presenta una pendiente de 41.4° y en los cortes correspondientes a las obra de toma se tendrán taludes de 75° .

El análisis de fracturamiento se realizó en los taludes mayor (M)

y menor (m) con una orientación que varía de 53°NW a 76°NE y en el talud frontal (f) con una orientación de 17°NW dando como resultado 12 cuñas (tabla 6.1).

De estas 12 cuñas existen dos que en su línea de intersección tienen un echado mayor al del talud y por ello quedan descartadas. Y de las diez restantes (tabla 6.2) las cuñas siguientes son iguales, es decir que, los planos que las forman son los mismos, lo que las hace diferentes es la intersección con las diferentes direcciones de los taludes:

$$A = E, B = D, C = F, e I = J.$$

6.2 Análisis Vectorial

En el análisis vectorial, (realizado mediante un programa elaborado por el Ing. Carlos Diaz Mora, basado en el método de Hendrom, Cording y Aiyer), se toman en cuenta los siguientes criterios:

- Las superficies de las discontinuidades que delimitan las cuñas se consideran como planas
- Las fuerzas actuantes, se aplican en el centroide de las cuñas
- A los planos de deslizamiento se les varía de igual manera el ángulo ϕ en un rango de 0° a 80° .
- El peso de la cuña se considera unitario (W).
- El coeficiente sísmico (cs) varía de 0.04 g a 0.1 g, aplicándose en dirección de la línea de intersección de manera horizontal.
- La presión hidrostática (sup) se hace variar de 0.05 W a 0.25 W. (Estas dos últimas son función del peso de la cuña.)

Se realizan todas las posibles combinaciones de estas fuerzas en cada una de las cuñas para obtener su factor de seguridad (F.S.).

En las figuras obtenidas para cada cuña tenemos 5 gráficas identificadas por las letras a), b), c), d) y e) las que explicaremos a continuación (Figs. 6.8 a 6.13):

- En las gráficas a) se muestra la variación del F.S. en un rango determinado para ϕ ($\phi_1 = \phi_2$), la primera curva presenta las condiciones obtenidas exclusivamente por peso propio ya que la sup = 0.0W y el cs = 0.0W, en las otras tres curvas se presentan las condiciones de la cuña cuando además del peso propio existe un cs de 0.04, 0.08 y 0.10 respectivamente.

- En las gráficas b), c), d) y e) el cs se presenta como una constante de 0.0, 0.04, 0.08 y 0.10 para cada gráfica y en estas existen 5 curvas que representan las condiciones de la cuña para un cs constante y para subpresiones de 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25.

-En margen izquierda las cuñas DD y EE presentan gran estabilidad ya que su factor de seguridad (F.S). se encuentra en un rango de 1.7 a 3.9 cuando el ángulo de fricción (ϕ) es de 20° a 40° , cuando se presente un coeficiente sísmico (cs) de 0.1 y subpresión (sup) de 0.25.

-En margen Derecha las condiciones de las cuñas A y B son totalmente estables, presentando un F.S. de 1.7 a 4.0 para ϕ de 20° a 40° , cuando se presente un cs = 0.1 g (siendo g la gravedad) y sup = 0.25W. Las cuñas I y J solo se presentan inestables en las condiciones mas extremosas, es decir, cuando se conjugara un cs = 0.1g y una sup = 0.25W, y en el caso que su ϕ tuviera valores entre 20° y 30° .

CAPITULO VII ASPECTOS SOBRESALIENTES DEL ANALISIS Y TRATAMIENTOS DEL MACIZO ROCOSO

7.1 Ubicación de las Cuñas

Del análisis realizado en el capítulo anterior se obtienen 8 cuñas, las cuales quedan hubicadas de la siguiente manera:

Cuña	Orientación del talud en el que se presentan	
margen izquierda		
BB	E-W/N	talud mayor
CC	E-W/N	talud mayor
FF	NE 30° / SE 75°	talud menor
margen derecha		
B	NW 53° / NE 75°	talud menor
D	NE 76° / NW 75°	talud menor
C	NW 53° / NE 75°	talud menor
F	NW 17° / NE 75°	talud frontal
H	NW 17° / NE 75°	talud frontal

Para el diseño de construcción se ha considerado un factor de seguridad de 1.5, apartir de esto se presenta la tabla 7.1 en donde se establece el ϕ requerido para las cuñas en diferentes condiciones de subpresión y sismo.

7.2 Condiciones de estabilidad en cada margen

En margen izquierda las condiciones de las cuñas requieren de soportes que permitan aumente el factor de seguridad aún en condiciones de peso propio. Los ϕ requeridos para estas cuñas en las

condiciones analizadas son en promedio mayores de 60° .

El talud mayor presenta dos tipos de cuñas que requieren de tratamiento especial y en las cuales el plano predominante es el S el cual deberá ser descrito con mayor precisión en los levantamientos geológicos.

Las cuñas que se presentan en margen derecha, necesitan principalmente de drenaje que disminuya la presión a la que se encuentran sometidas y un soporte adicional.

De los dos taludes que presentan cuñas en esta margen el talud frontal deberá ser tratado con soporte y drenaje especial ya que es el que presenta mayor altura .

Es necesario recurrir a pruebas de campo para establecer el ángulo de fricción que se va utilizar durante la construcción de la obra y mediante el cuál se puede entrar a las gráficas 6.8 a 6.13 y obtener los factores de seguridad para las diferentes condiciones de presión hidrostática y sismo que se puedan presentar en el macizo rocoso.

CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 Geología

. En cuanto a la litología, esta área se encuentra cubierta por un macizo rocoso que aún cuando está fracturado es de muy buena calidad. Los procesos de hidrotermalismo que le han afectado dejaron como residuo silíceo, el que incrementa la dureza y rigidez de la roca, aumentando la homogeneidad a mayor profundidad. Esto favorece a las excavaciones profundas que se realizarán en ambas margenes.

. La geología estructural presentada en el sitio, comprende principalmente una familia de fallas (colorines), el fracturamiento paralelo asociado a éstas, la pseudoestratificación y la intrusión de diques en un sistema de fracturamiento preexistente con dirección NW/NE.

. Los rellenos de las discontinuidades son principalmente de silíceo, de arcilla y en pocos casos de calcita. Estos rellenos no son de espesores constantes a excepción de zonas intensamente falladas en las que se forma un halo arcilloso.

En los análisis de estabilidad realizados no se considera que el deslizamiento se lleve a cabo exclusivamente por el relleno, sino que por la heterogeneidad de las discontinuidades existen grandes áreas donde el contacto es roca a roca y por lo tanto el ángulo de fricción del relleno no influirá en el deslizamiento.

. El fracturamiento no presenta un espaciamiento y continuidad constantes, más bien son aleatorios o bien podrían relacionarse a los diferentes eventos que formaron estos depósitos por lo que es más

fácil hacer una correlación horizontal que vertical .

. Es necesario recurrir a una descripción más detallada de los planos de discontinuidad, así como de los fracturamientos locales que se puedan presentar en las zonas donde no se ha hecho limpia del terreno.

8.2 Análisis de estabilidad

. Las gráficas obtenidas del análisis realizado para las cuñas en cada una de las márgenes, permite obtener el factor de seguridad para cualquier ángulo de fricción que se pueda determinar con mayor precisión en pruebas de campo, pudiendo combinar diferentes condiciones de subpresión y sismo que afecten al macizo rocoso.

. El resultado final de la estabilidad de los taludes en ambas márgenes puede quedar determinado de la siguiente manera:

Margen derecha existen 5 cuñas; 3 en el talud menor y 2 en el talud frontal. El tratamiento recomendado está enfocado principalmente al drenaje y posteriormente a un soporte adecuado.

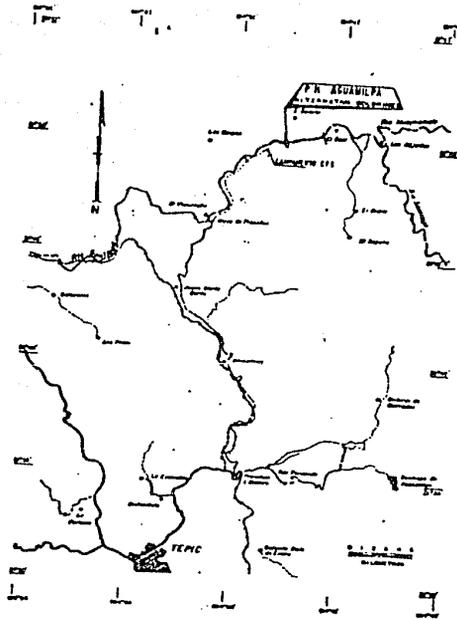
Margen izquierda, tres cuñas; 2 en el talud mayor y una en el talud menor, las cuales requieren indudablemente de un soporte previamente calculado.

. Este trabajo cumple con el objetivo de ser un texto sencillo, el cual puede ser un complemento en la aplicación de los conocimientos adquiridos en las materias de Geotécnica IV y Mecánica de Rocas II. Siendo evidente la necesidad de la interrelación entre las actividades de los ingenieros civiles y geólogos para la obtención de resultados más adecuados.

FIGURAS



a) Localización



b) Acceso

Figura 2.1

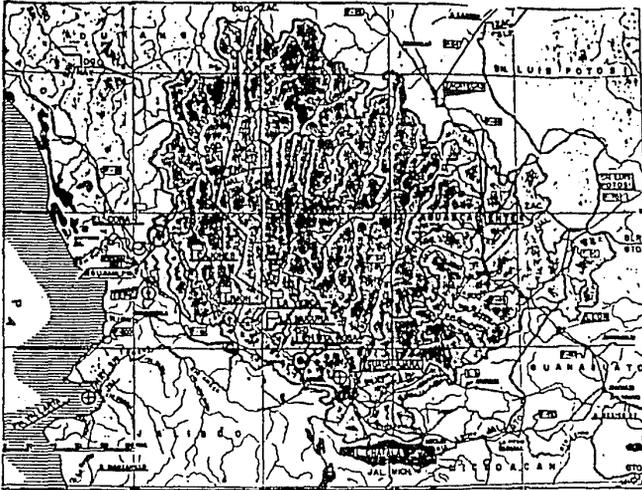


Figura 2.2 Desarrollo hidroeléctrico del río Santiago

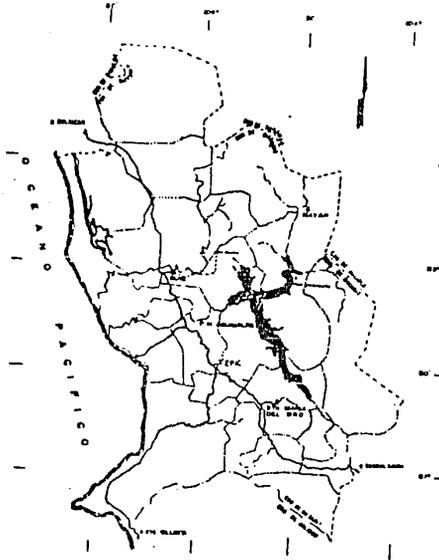


Figura 2.3 Municipios inundados por el embalse del P.H. Aguamilpa

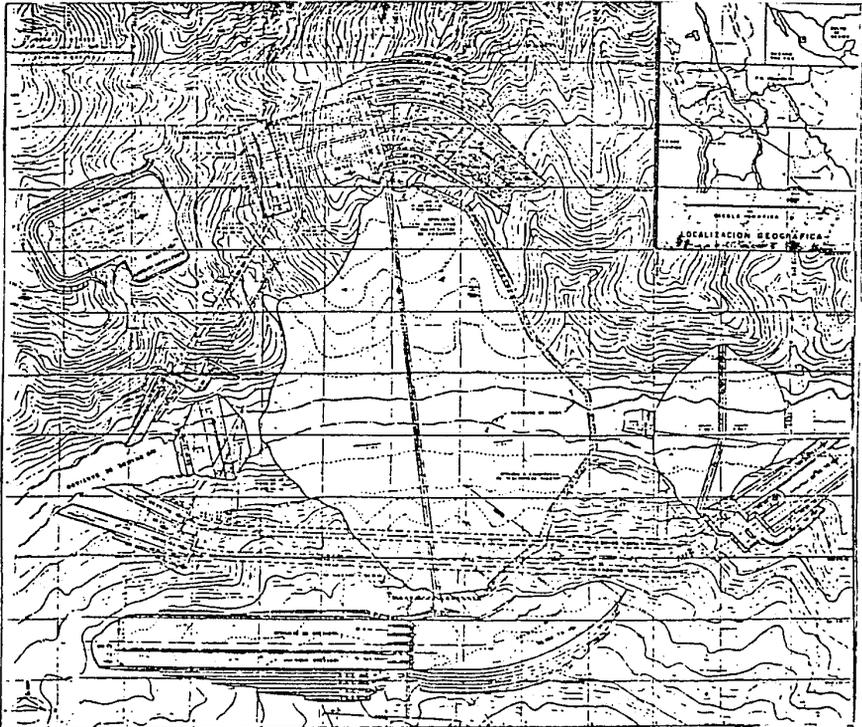


Figura 2.4 Distribución de Obras Civiles

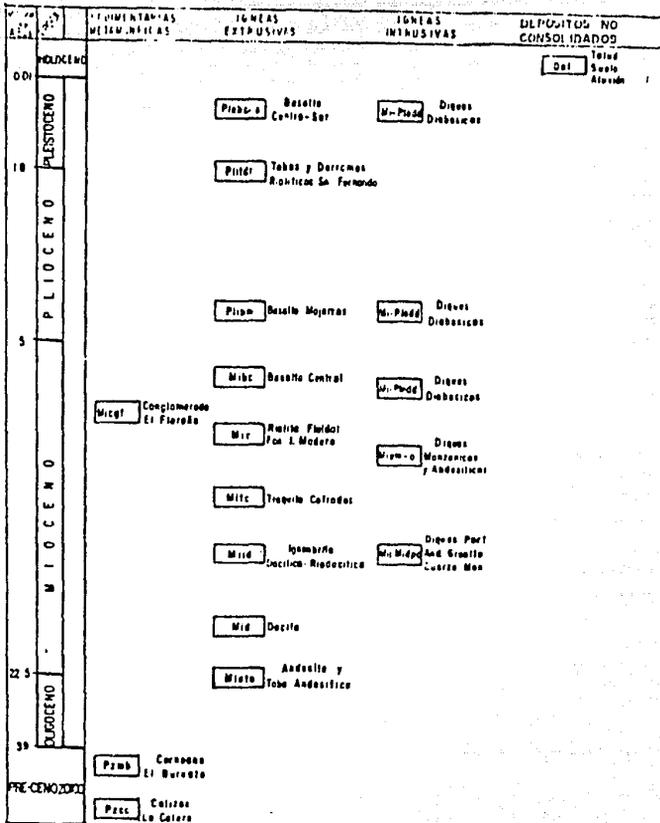
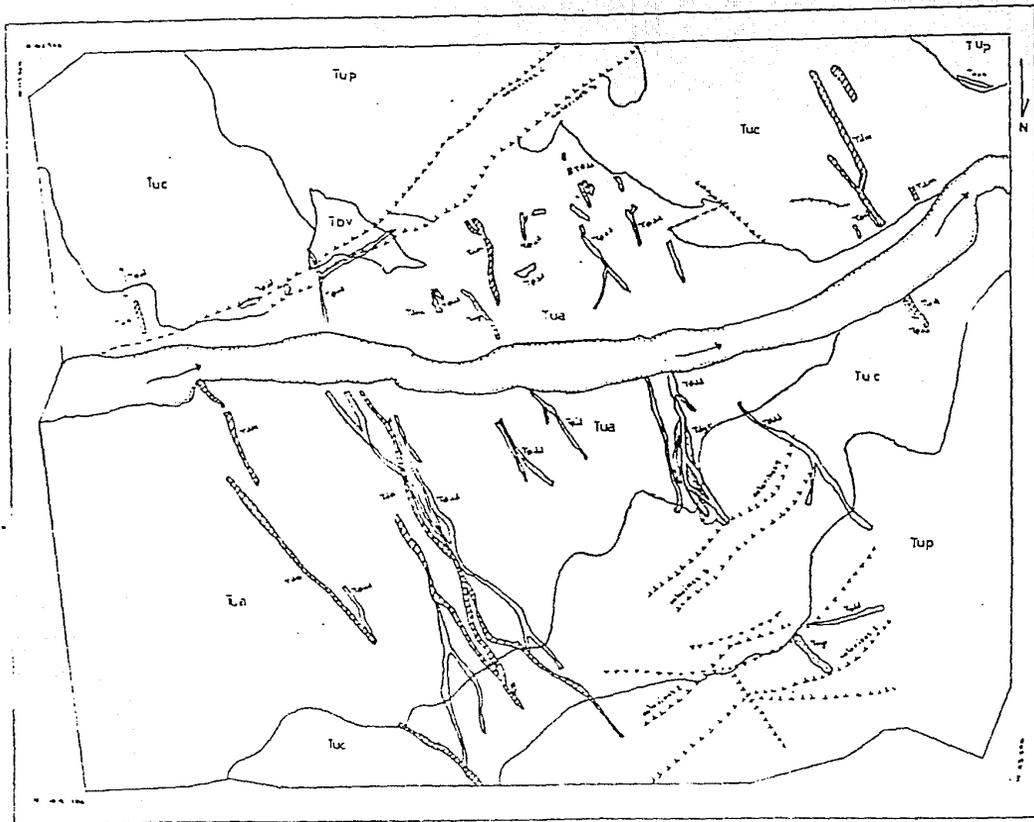


Figura 3.1 Columna Litológica



ESQUEMA DE LOCALIZACION

SIMBOLOGIA

GEOLOGICA TOPOGRAFICA

Unidad geológica Rio
 Contorno normal
 Carretera normal

COLUMNA LITOLÓGICA

Sin litología estimada
 TdV Dique Volcánico
 TUb Dique Barro Colorado
 Tuc Unidad Caliche
 TUn Dique Masoche
 TUp Dique Espinosa
 Sin litología estimada

TdV: Dique Volcánico
TUb: Dique Barro Colorado
Tuc: Unidad Caliche
TUn: Dique Masoche

ESCALA 1:5200

MAPA GEOLOGICO

fig. 32

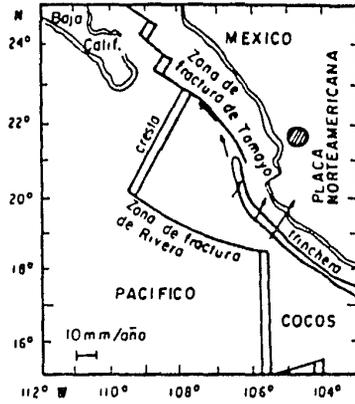


Figura 3.3 Placa de Riviera y boca del Golfo de California

Simbología

-  Contacto geológico
-  Fracturamiento
-  pseudoestratificación
-  Barreno
-  Sección vertical

Columna Litológica

Rocas igneas extrusivas

UP

Unidad Picachos

UC

Unidad Colorín

UA

Unidad Aguamilpa

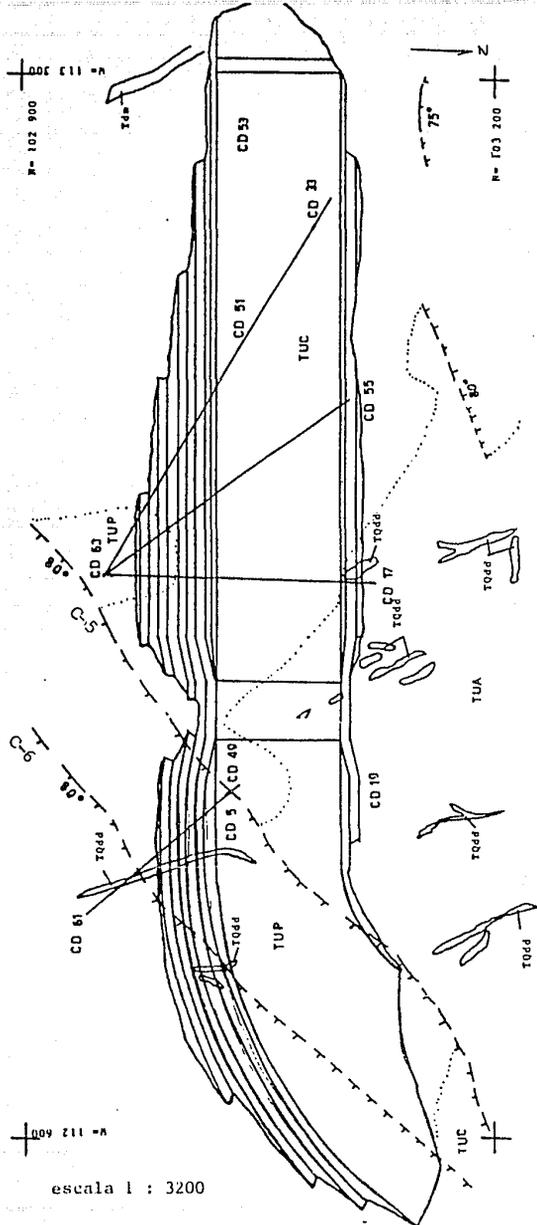
Rocas Igneas Intrusivas

TQm

Dique monzónico

TQdd

Dique diabásico



escala 1 : 3200

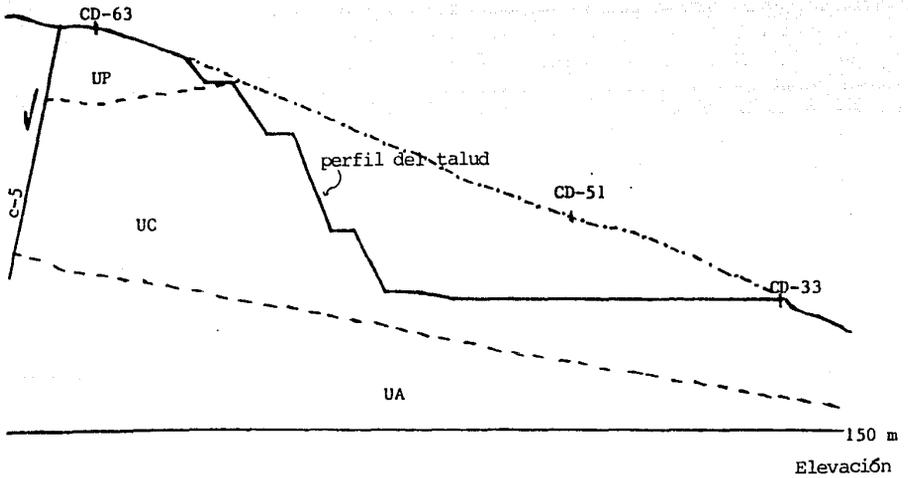
Figura 4.1 Geología y cortes del Vertedero

Simbología

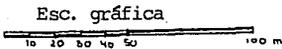
Columna Geológica

-  Perfil natural del terreno
-  Contacto geológico
-  Falla
- CD - 1 Barreno

-  UP
picaos
-  UC
colorines
-  UA
aguamilpa

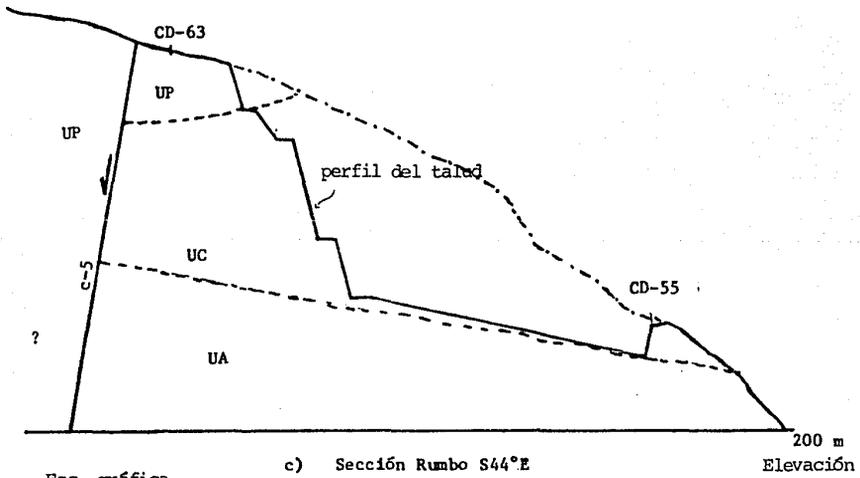
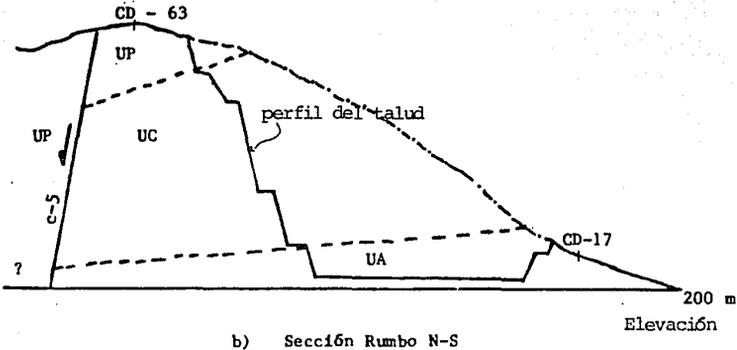


a) Sección Rumbo N49°



Escala 1 : 2 000

Figura 4.2 Sección Vertedor



Esc. gráfica

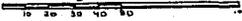
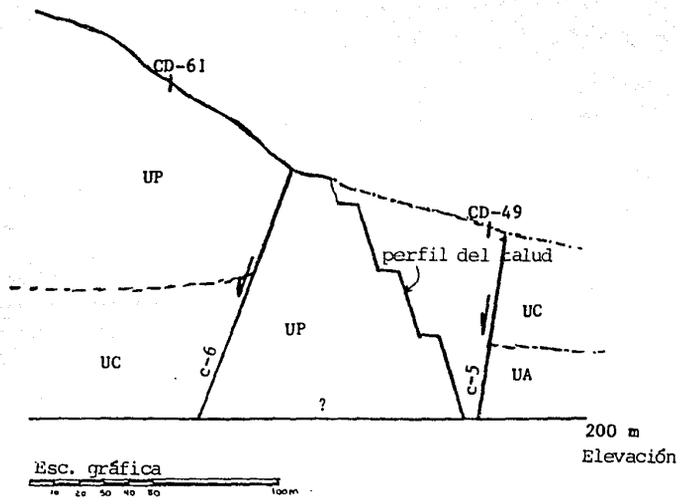


Figura 4.2 Sección Vertedor

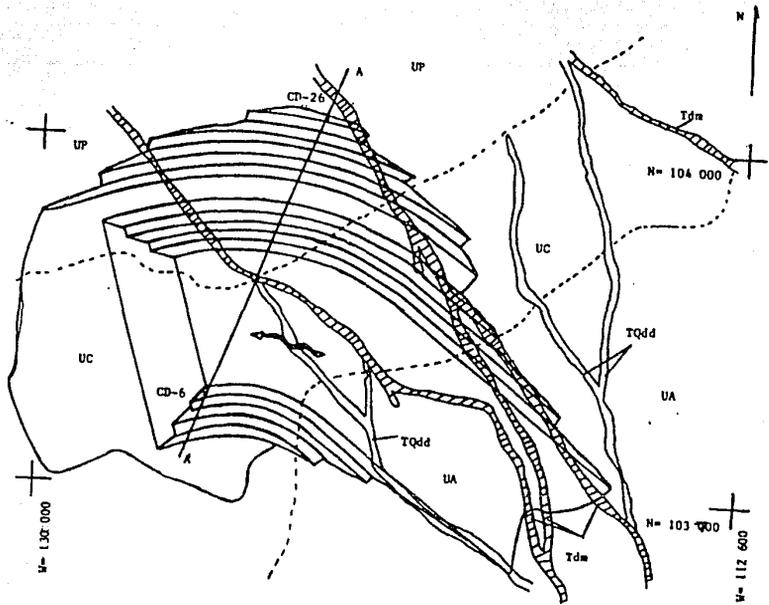
Escala 1 : 2 000



d) Sección Rumbo N20°E

Escala 1 : 2000

Figura 4.2 Sección Vertedor



escala 1 : 4 200

Simbología

- Contacto geológico
- Fracturamiento
- Pseudoestratificación
- Barreno
-

Columna Litológica

Rocas Igneas Extrusivas

- UP
- Unidad Picachos
- UC
- Unidad Colorín
- UA
- Unidad Aguamilpa

Rocas igneas Intrusivas

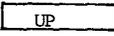
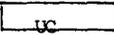
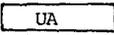
- Tdm
- Dique Monzonítico
- TQdd
- Dique dalabásico

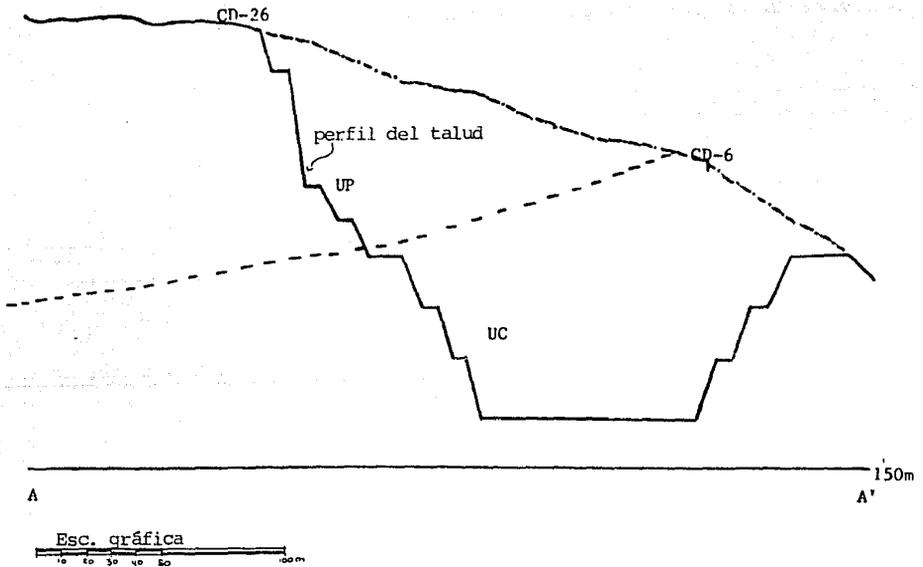
Figura 4.3 Geología y cortes de Obra de Toma

Simbología

	Perfil natural del terreno
	contacto geológico
	Falla
CD-1	Barreno

Columna Litológica

	Unidad Picachos
	Unidad Colorines
	Unidad Aguamilpa



a) Sección Rumbo N68°E

Escala 1 : 2 000

Figura 4.4 Sección Obra de Toma

Tabla 5.1 Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio

BARENO	TOBA BRECHOIDE RIOLITICA										DIQUES DIABASICOS					
	R _c	E	R _t	R _s	R _f	Y _d	i	n	R _c	E	R _t	R _s	R _f	Y _d	i	n
CD-4	N	37	37	25	13	26	37	23	23	6	5					
	\bar{X}	773	311	102	158	84	2.63	0.26	3.66	412	311	47	35			
CD-9	N	19	19	15	3	6	20	11	11	7	6	2	2	4	4	4
	\bar{X}	669	419	86	156	117	2.65	0.12	2.93	538	385	68	104	0.41	4.27	60
CBR-1	N	29	29	14	11	16	28	14	14	47	13	---	---	60	40	40
	\bar{X}	1094	478	158	170	158	2.64	0.17	3.22							
CV		61	25	18	39	37	3	107	34							

R_c Resistencia en compresión simple, en kg/cm²

E Módulo de deformación, definido como el módulo secante a 0.5 R_c en ton/cm²

R_t Resistencia a la tensión indirecta (prueba brasileña), en kg/cm²

R_s Resistencia al corte doble, en kg/cm²

R_f Resistencia a la flexión, en kg/cm²

Y_d Peso volumétrico, en ton/m³

i Índice de alteración, en %

n Porosidad, en %

N Número de datos

\bar{X} Promedio

CV Coeficiente de variación, en %

Tabla 5.2 Resultados promedio de las pruebas de laboratorio del barreno CD-51

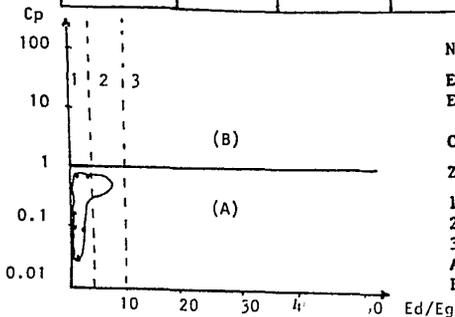
	UNIDAD COLORIN				UNIDAD ACUMILPA			
	N	\bar{x}	CV	$\frac{\bar{x}}{N}$	N	\bar{x}	CV	$\frac{\bar{x}}{N}$
Rc	10	1182	54	13	13	1205	67	3
E	10	383	40	11	115	398	47	3
Rf	10	148	41	3	215	50	6	6
Rg	2	166	26	3	13	13	4	4
Rh	5	151	33	5	148	65	2	2
Ri	10	2.59	4	3	13	3	3	3
Yd	18	0.46	121	9	2.64	0.22	6	6
¿	17	2.34	89	5	0.15	38	9	9
n	17	2.34	89	5	0.40	78	9	9

NOMENCLATURA

- Rc Resistencia en compresión simple, en kg/cm²
 E Módulo de deformación, definido como el módulo secante al 0.5 Kg. en ton/cm²
 Ri Resistencia a la tensión indirecta (Prueba Brasileña), en kg/cm²
 Rg Resistencia al corte doble, en kg/cm²
 Rh Resistencia a la flexión, en kg/cm²
 Yd Peso volumétrico, en ton/m³
 ¿ Índice de alteración, en %
 n Porosidad, en %
 N Número de datos
 \bar{x} Promedio
 CV Coeficiente de variación, en %

Tabla 5.3 Módulos de deformabilidad en socavón B-C (placa flexible)

Sitio	DIRECCION	Eg (ton/cm ²)	Ed (ton/cm ²)	Ed/Eg	Cp mm/kg/cm ²	OBSERVACIONES
No. 1 Pared W	 al rfo	77	446	7.8	0.0051	zona del dique y fallas con relleno de arcilla Idem
		Pared E	124	422	3.4	
No. 2 Pared N	⊥ al rfo	355	1090	3.1	0.0011	Fracturas selladas
		Pared S	-	-	-	-
No. 3 Piso	vertical	78	163	2.1	0.0063	Falla Colorines 2. Fallas con relleno de arcilla
		Techo	-	-	-	-
No. 4 Pared S	⊥	107	278	2.6	0.0033	Falla importante con rellenos de arcilla, rumbo perpendicular a la dirección de la carga Fracturas con arcilla de rumbos semiparalelo a la aplicación de carga
		Pared N	495	750	1.4	
No. 5 Techo	vertical	147	242	1.6	0.0023	Dique diabásico
		Piso	230	230	1.0	-
No. 6 Pared W	 al rfo	121	294	2.4	0.0029	Dique diabásico. Fracturas menores
		Pared E	255	380	1.5	0.0003



Nomenclatura:

Eg : módulo de deformabilidad global

Ed : módulo de deformación elástica de descarga

Cp : coeficiente de deformación irre recuperable
(0.01 mm/Kg/cm²)

Zonas en la gráfica:

1: Roca densa

2: Discontinuidades de mediana abertura

3: Juntas muy abiertas

A: Deformaciones prácticamente recuperables

B: Componente inelástica importante

Tabla 5.4 Pruebas de Roseta

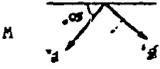
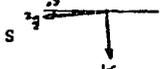
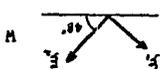
Prueba No.	Dirección de deformaciones principales	Deformaciones unitarias principales instantáneas ϵ_1 ϵ_2	Módulo elástico de prueba de placa kg/cm ²	Esfuerzo principal mayor kg/cm ²
2	E 	6.96×10^{-4} 4.16×10^{-4}	278 000	237
3	E 	5.8×10^{-4} -0.6×10^{-4}	750 000	452
4	N 	2.78×10^{-4} 1.8×10^{-4}	380 000	131
5	E 	3.66×10^{-4} 0.78×10^{-4}	380 000	156

Tabla 5.5 Pruebas de Gato Plano y comparación de resultados

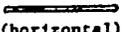
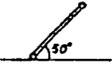
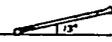
Sitio No.	Dirección e inclinación del esfuerzo normal medido σ_n	Esfuerzo medido con gato plano σ_n (kg/cm ²)	Esfuerzo normal σ_n en kg/cm ² , para un empuje horizontal en la dirección E-M de			
			$\sigma_{rec} = 0$ (kg/cm ²)	$\sigma_{rec} = 20$ (kg/cm ²)	$\sigma_{rec} = 40$ (kg/cm ²)	$\sigma_{rec} = 60$ (kg/cm ²)
1	N 	69	84.5	64.5	44.5	24.5
2	M 	52	25.7	37.4	48.6	62.1
3	M 	70	73.9	74.9	75.9	76.9
4	N 	72.6	84.7	67.6	47.7	27.9
5	M 	48.8	45.5	56.5	67.6	78.6
6	N 	49.2	84.5	64.5	44.5	24.5

σ_{rec} = esfuerzo técnico en dirección E-M
 σ_n = esfuerzo normal en la dirección de medición
 σ_n = $\frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} + \frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \cos 2\theta$

θ = ángulo del esfuerzo normal con respecto a la vertical
 σ_v = $3P_v - Q$: esfuerzo vertical en la pared del socavón
 P_v = H. Y : presión vertical debida al peso propio
 Q = $\left\{ \begin{array}{l} K_o P_v \text{ (dirección E-M)} \\ K_o P_v + \sigma_{rec} \text{ (dirección M-S)} \end{array} \right.$

K_o = $\frac{1-v}{v} = \frac{1}{3}$
 γ = 2.64 g/cm³ peso específico promedio de la roca
 v = 0.25: relación de Poisson obtenido de ensayos dinámicos en socavones
 H = altura

Tabla 5.6 Módulos de deformabilidad (gato plano)

Prueba No.	Posición y dirección del gato plano	Pc (kg/cm ²)	S (kg /cm ²)	Wj (cm)	E (ton/cm ²)	E (promedio) (ton/cm ²)	observaciones
1	N  S (horizontal)	86	67.1	0.0128	174	199	Zona de falla Colorines 2
		90	70.2	0.0104	224		
2	E  W 30°	54	42.1	0.0094	149	148	
		80	62.4	0.014	148		
3	E  W 12°	84	65.6	0.014	156	164	Zona de falla Colorines 2 y dique diabásico
		96	74.9	0.0144	173		
4	S  N 3°	86	67.1	0.0126	177	178	
		100	78.0	0.0142	182		
5	E  W 48°	50	39.0	0.009	144	146	
		76	59.3	0.0132	149		
6	N  S (horizontal)	55	42.9	0.0058	246	235	
		80	62.4	0.0092	225		

Nomenclatura:

- Pc = presión de cancelación
- S = esfuerzo normal al plano de la ranura
- ω_j = desplazamiento del punto de referencia
- E = módulo de deformabilidad

Tabla 5.7 Módulos de deformabilidad recomendados para el diseño de estructuras civiles

Dirección de las mediciones	MODULO DE DEFORMABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO(*)	INTERVALO DE ESFUERZOS PARA EL MODULO RECOMENDADO
E - W (horizontal)	180 ton/cm ²	0 a 30 kg/cm ²
	150 ton/cm ²	30 kg/cm ² a 50 kg/cm ²
N - S (Horizontal)	250 ton/cm ²	0 a 30 kg/cm ²
	230 ton/cm ²	30 kg/cm ² a 50 kg/cm ²
Vertical	150 ton/cm ²	0 a 50 kg/cm ²

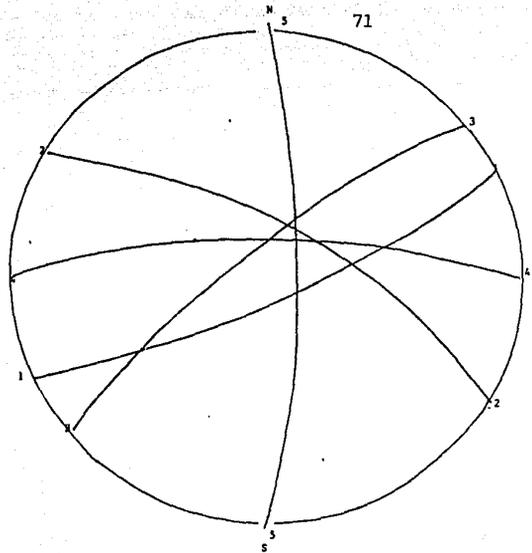
(*) Dependiendo de las condiciones geológicas, pueden existir zonas particulares en las cuales el módulo de deformabilidad sea inferior al recomendado.

Tabla 5.8 Esfuerzos internos en el macizo rocoso

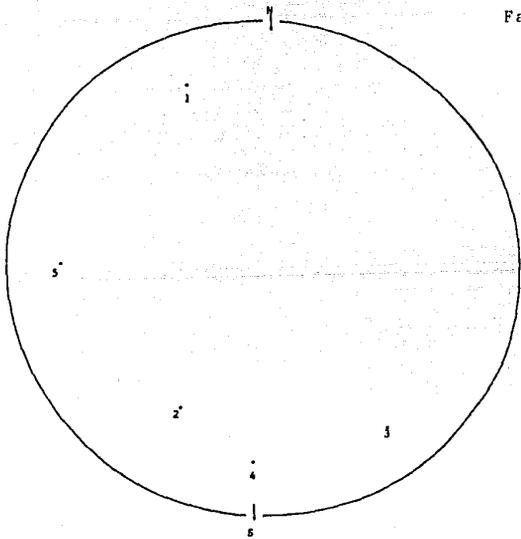
DIRECCION	ESTADO DE ESFUERZOS
Vertical	Esfuerzos debidos al peso propio
Horizontal (N-S)	Esfuerzos debidos al peso propio, aproximadamente de 1/3 del esfuerzo vertical
Horizontal (E-W)	Esfuerzos debidos al peso propio o a un esfuerzo tectónico adicional no mayor de 40 kg/cm ²

MARGEN IZQUIERDA

- 1) NE 65° / 77° SE
- 2) NW 60° / 67° NE
- 3) NE 50° / 77° NW
- 4) E - W / 75° N
- 5) N - S / 77° E

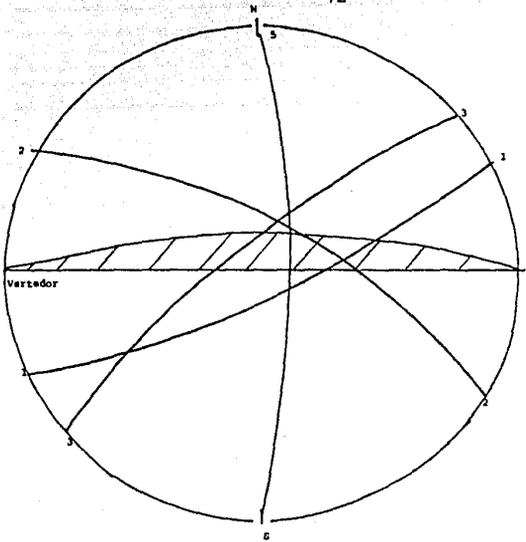


Familia de fracturamiento

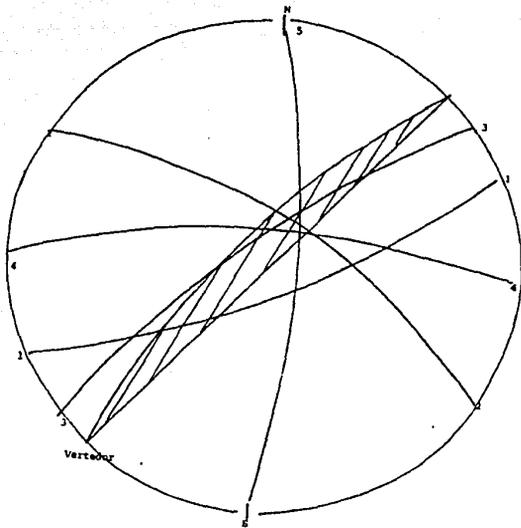


Polos de las familias de Fracturas

Figura 6.1 Fracturamiento de Márgen Izquierda

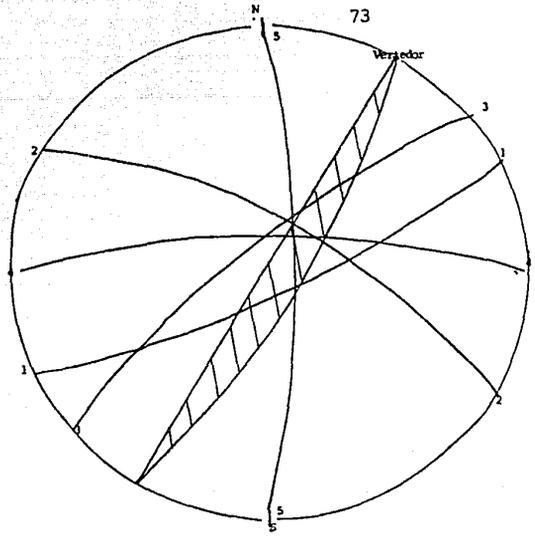


Talud E-W/N

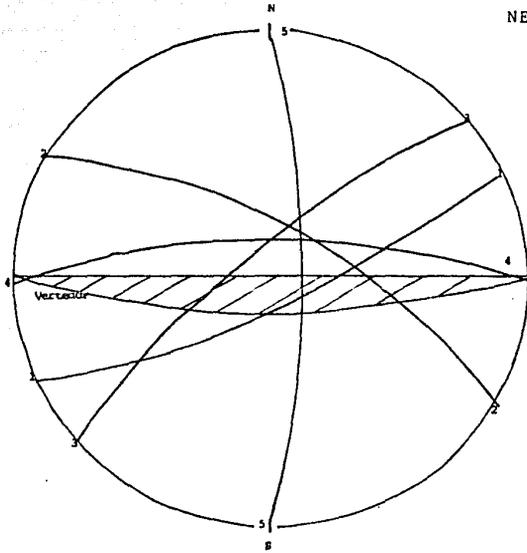


Talud NE 41°/NW 75°

Figura 6.2 Taludes del Vertedor



NE 30° / SE 75°

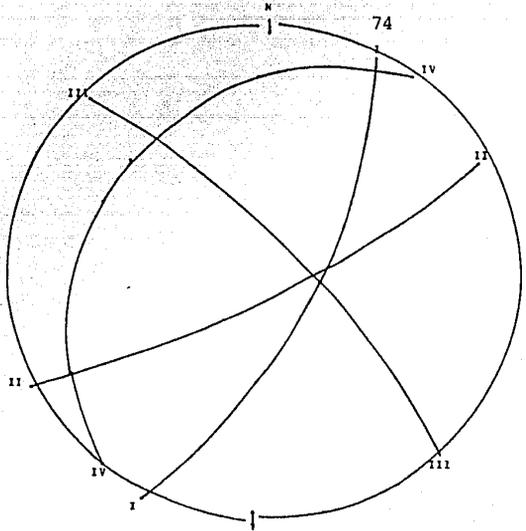


E - W/S

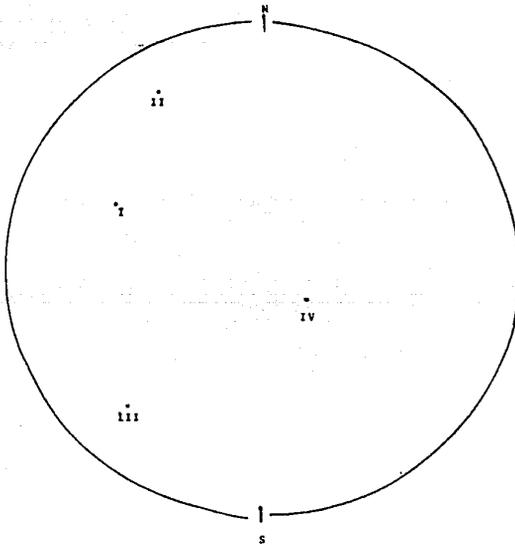
Figura 6.3 Taludes del Vertedor

MARGEN DERECHA

- I NE 25° / 65°SE
- II NE 60° / 78°SE
- III NW 45° / 75°NE
- IV NE 35° / 22°NW

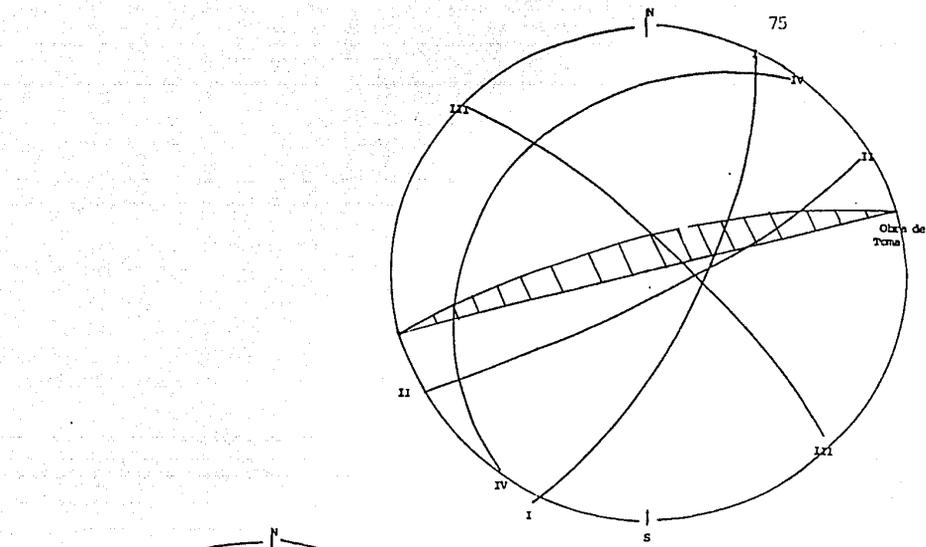


Familias de fracturamiento

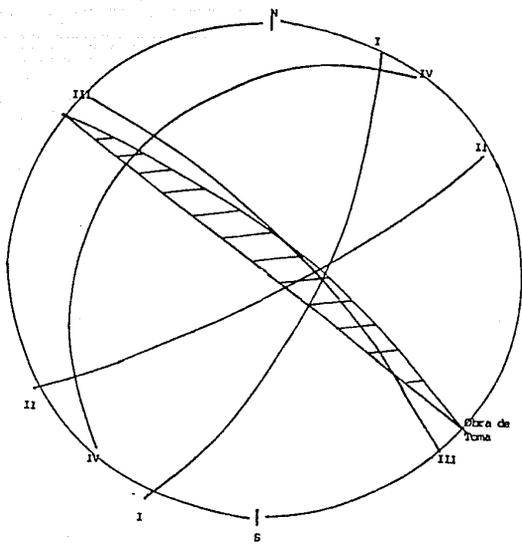


Polos de las familias de fracturas

6.4 Fracturamiento Márgen Derecha

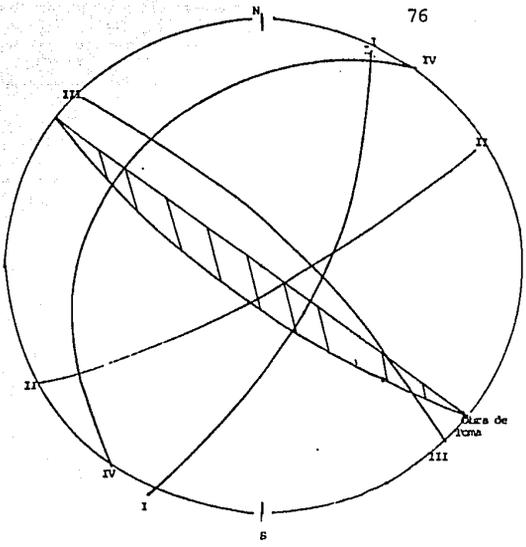


NE 76° / NW 75°

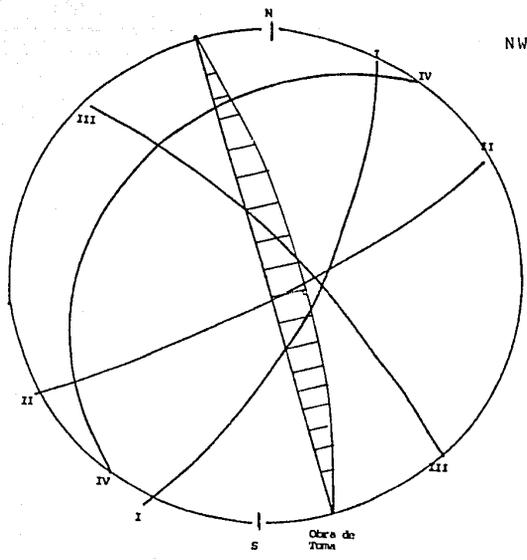


NW 53° / NE 75°

Figura 6.5 Taludes de Obra de Toma



NW 53° / SW 75°



NW 17° / NE 75°

Figura 6.6 Taludes de Obra de Toma

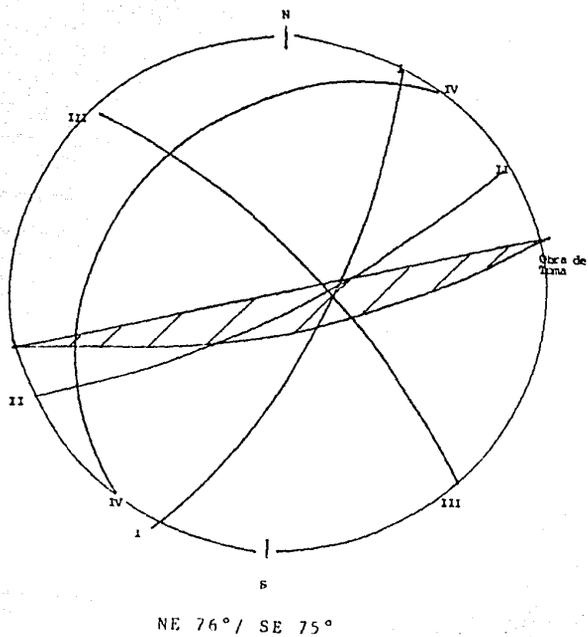


Figura 6.7 Talud de Obra de Toma

	Talúd	Sistemas de Fracturamiento Inestable	Cuñas	Observaciones	
MÁRGEN DERECHA	NW53°/NE75° (m)	1,3,4	1.4 1.3 3.4 1.2	> talúd	
	NE76°/NW75° (m)	3,4	3.4		
	NW17°/NE75° (f)	1,2,3,4	1.4 1.2 1.3 2.3		
	NW53°/SW75° (M)	2,4	2.4		
	NE76°/SE75° (M)	1,2,4	1.2 2.4	> talúd	
MÁRGEN IZQUIERDA	E-W/N (M)	2,3,4,5	2.4 4.3 2.3 5.3 5.2 5.4	= talúd = talúd	
	NE41°/NW75° (M)	2,3,4	3.4 2.3 2.4 1.3	> talúd > talúd hacia adentro	
	E-W/S (m)	1,3,5	1.5 1.3	> talúd	
	NE30°/SE75° (m)	1,5	1.5		

(M) - Talúd mayor

(m) - Talúd menor

(f) - Talúd frontal

Tabla 6.1 Intersección de los diferentes talúdes con las familias de fracturamiento en cada márgen

Cuña	β_1	β_2	γ_1	γ_2	P_1	P_2
A 1.4	92°	102°	22°	115°	4	1
B 3.4	92°	172°	22°	105°	4	3
C 1.2	67°	102°	102°	115°	2	1
D 3.4	69°	149°	22°	105°	4	3
E 1.4	128°	138°	22°	115°	4	1
F 1.2	103°	138°	102°	115°	2	1
G 1.3	28°	138°	102°	115°	2	1
H 2.3	28°	103°	75°	102°	3	2
I 2.4	67°	92°	78°	158°	2	4
J 2.4	16°	41°	78°	158°	2	4
AA 2.3	40°	150°	77°	113°	3	2
BB 5.3	30°	90°	77°	103°	3	5
CC 5.2	90°	150°	77°	113°	5	2
DD 1.3	156°	171°	77°	103°	1	3
EE 1.3	25°	40°	77°	103°	1	3
FF 1.5	30°	145°	77°	77°	5	1

Tabla 6.2 Definición de los ángulos β y γ en cada una de las cuñas

ESTA TESIS NO DEBE
 SER REPRODUCIDA
 SIN LA PERMISIÓN

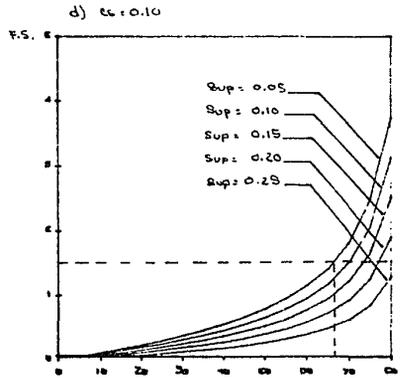
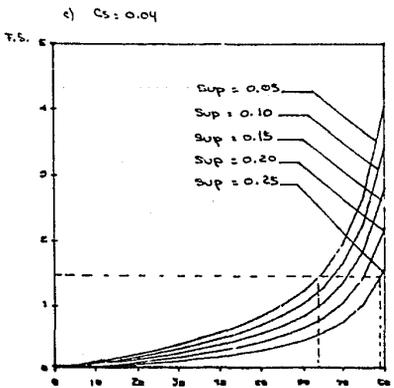
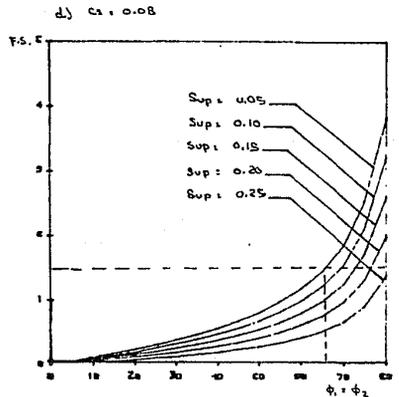
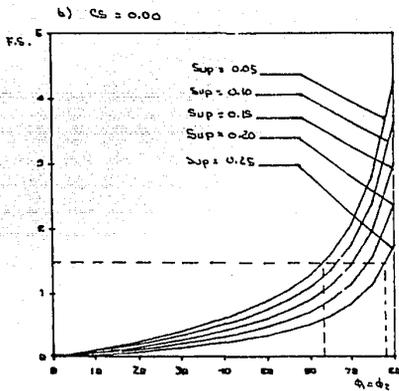
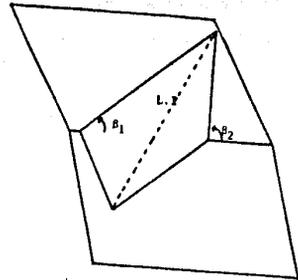
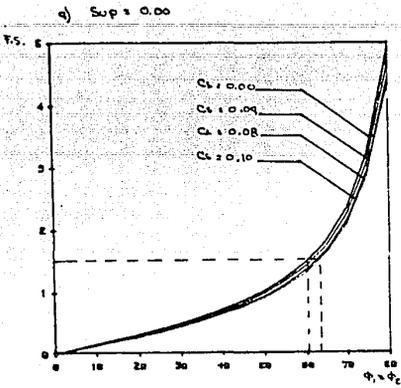


Figura 6.8 Cuña BB

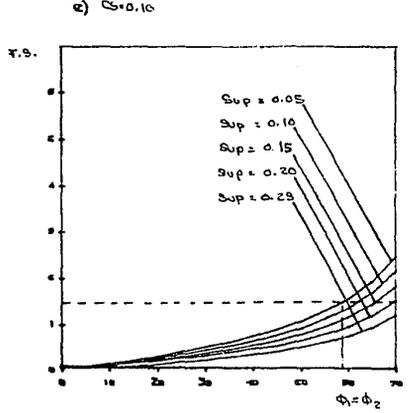
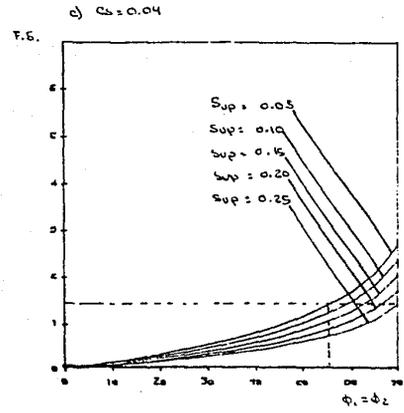
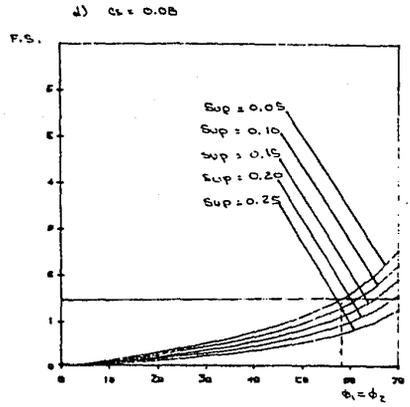
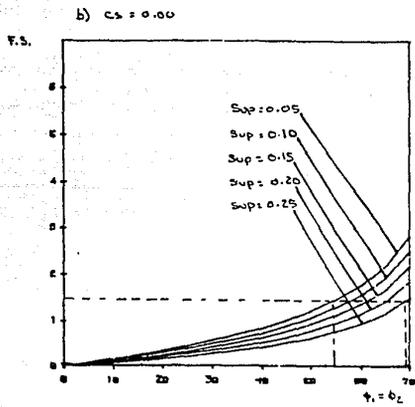
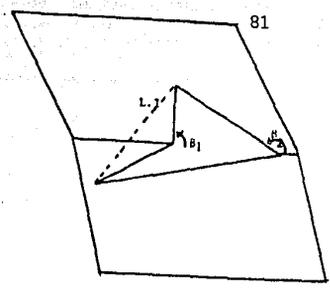
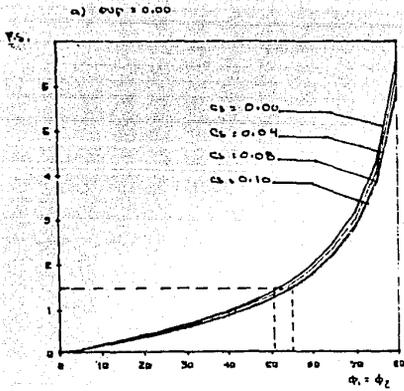


Figura 6.9 Cuña CC

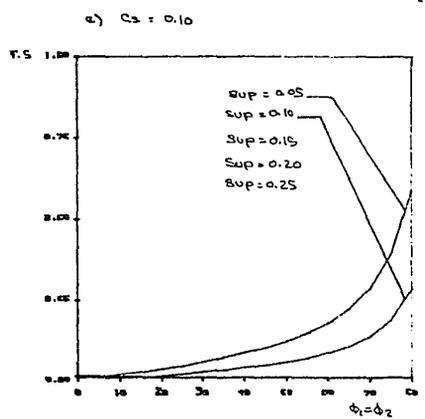
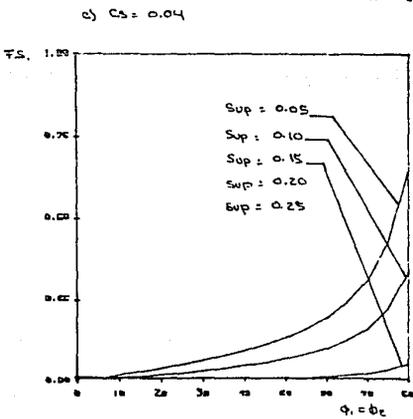
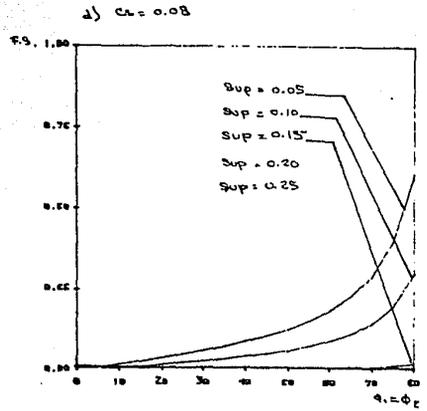
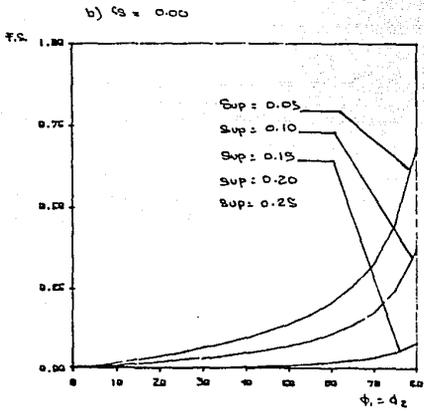
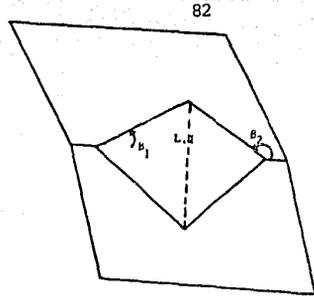
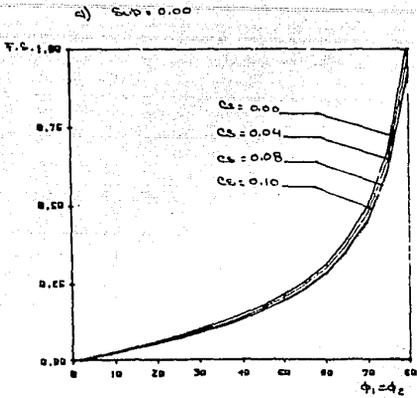


Figura 610 Cuña FF

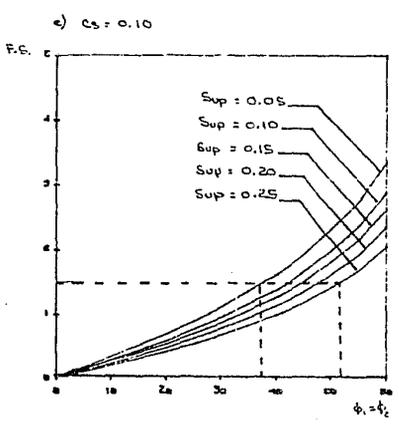
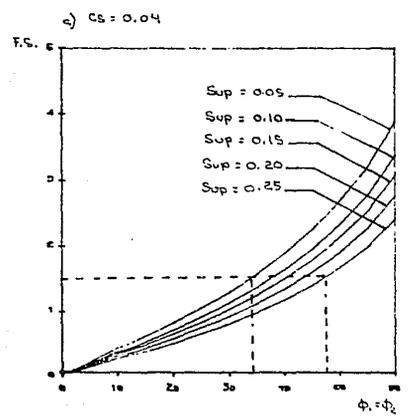
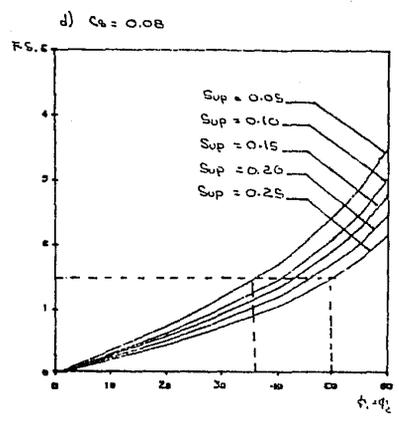
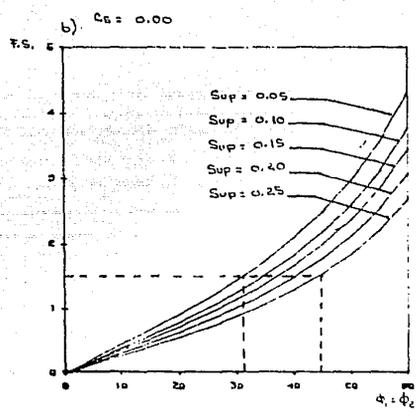
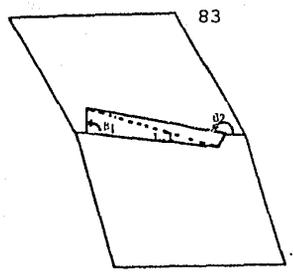
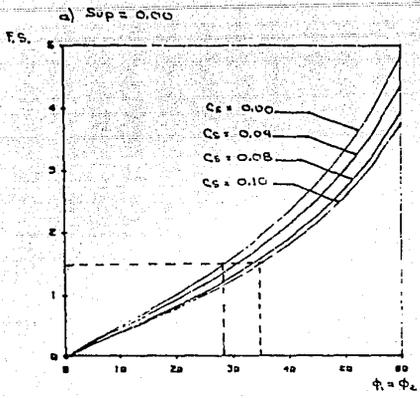


Figura 6.11 Cuaña B y D

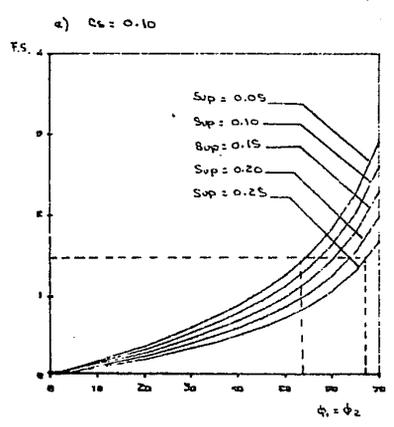
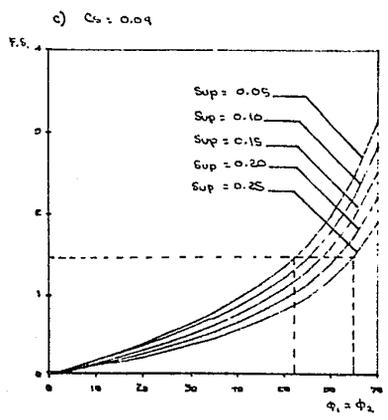
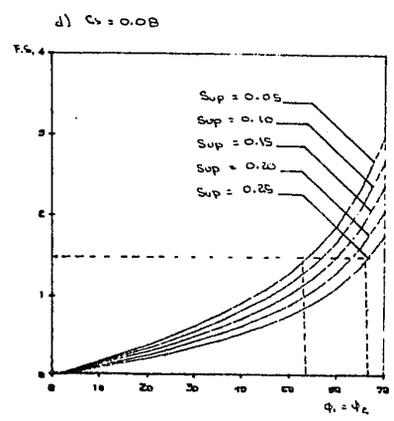
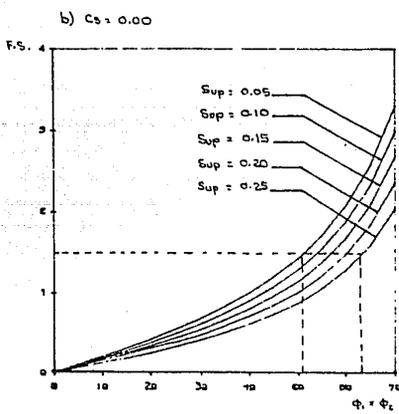
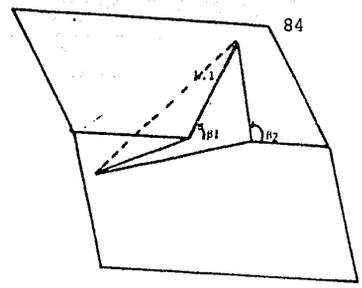
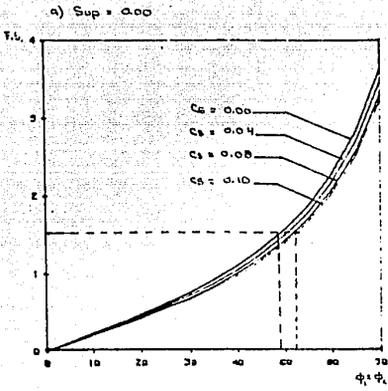


Figura 6. 12 Cuña C y F

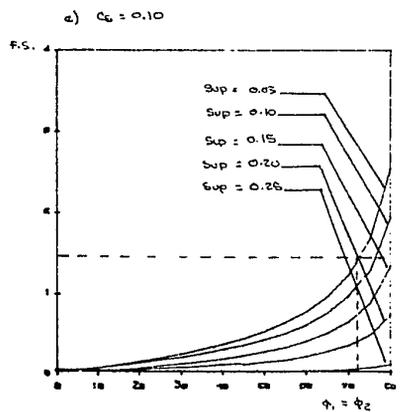
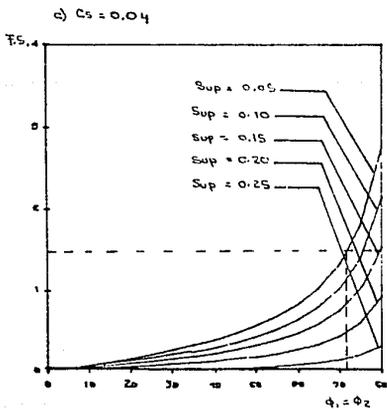
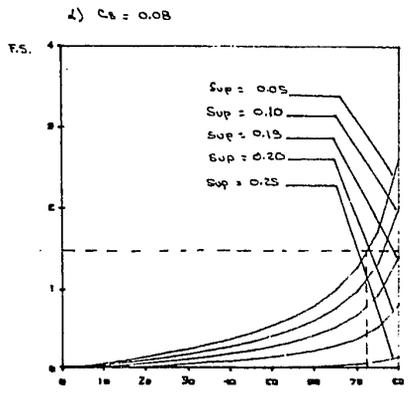
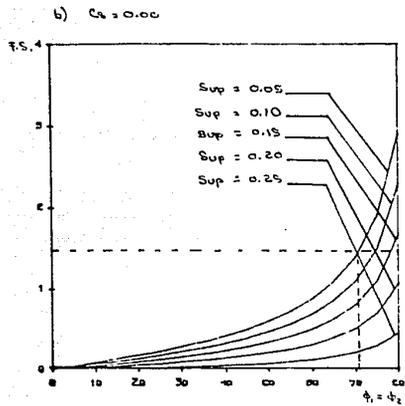
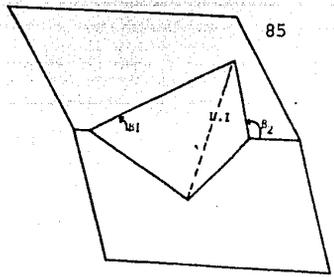
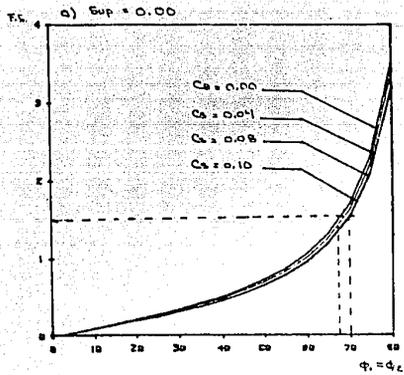


Figura 6.13 Cuña H

Cuña	Para Peso Propio		Para Cs = 0.1 y Sup = 0.25		F.S. = 1.5					
	ϕ	F.S.	ϕ	F.S.	a) ϕ req.	b) ϕ req.	c) ϕ req.	d) ϕ req.	e) ϕ req.	
M. Derecha	B y D	0-60°	0-5	0-60°	0-2	28°-35°	31°-45°	35°-49°	37°-50°	38°-51°
	C y F	0-70°	0-4	0-70°	0-1.7	49°-51°	50°-62°	51°-65°	55°-65°	55°-67°
	H	0-80°	0-4	0-80°	0-0.2	69°-70°	70°<	72°<	73°<	73°<
M. Izquierda	BB	0-80°	0-5	0-80°	0-1.3	60°-61°	62°-79°	63°-79°	66°<	69°<
	CC	0-80°	0-7	0-70°	0-1.3	50°-55°	55°-70°	57°<	58°<	59°<
	FF	0-80°	0-1	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 7.1 Relación de ϕ y F.S. para las condiciones extremas y para F.S. de diseño

BIBLIOGRAFIA

- Comisión Federal de Electricidad (CFE), "Manual de Diseño de Obras Civiles, Estabilidad de Taludes", Geotécnica B.3.1, Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- CFE, "Estudio de Prefactibilidad Geotécnica de la Alternativa Colorines", Informe Junio 1982.
- CFE, "Aspectos geológicos Ingenieriles del P.H. Aguamilpa", Informe diciembre 1983.
- CFE, "Informe de Permeabilidad Piezometria, Geologia y Geofisica", Informe julio 1987
- CFE, "Informe de las Condiciones de la Traza del Parámetro mojado de la Cortina", Informe septiembre 1987.
- CFE, "Informe de Resultados de las Pruebas de Laboratorio realizadas con núcleos de roca de los barrenos CD-4, CD-9 y CBR-1", Informe 1988
- CFE, "Informe de las pruebas de laboratorio realizadas con núcleos de roca del barreno CD-51", Informe 1988.
- HENDROM A.J., CORDING E.J. y AIYER A.K., "Analytical and Graphical Methods for the Analysis of Slopes in Rock masses".
- RAMIREZ A., "Analyse Geotechnique des glissements de versants sedimentaires sur des plans de stratification", Tesis doctoral 1987.

- RIVERA M., "Análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos", Tesis 1983.