

13
2g



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales
"A C A T L A N"

ANALISIS DE LAS FALLAS OCURRIDAS EN LOS
TALUDES DE LA AUTOPISTA
TIJUANA-ENSENADA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
ARTURO LOPEZ FUERTE

México, D. F.

1987



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"
COORDINACION DEL PROGRAMA DE INGENIERIA

CI/176/1987.

SR. ARTURO LOPEZ FUERTE
Alumno de la carrera de Ingeniería
Civil.
P r e s e n t e.

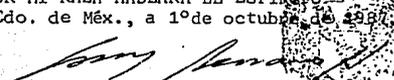
De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 14 de septiembre de 1984, me complace notificarle que esta Coordinación tuvo a bien asignarle el siguiente tema de tesis: "Análisis de las Fallas Ocurredas en los Taludes de la Autopista Tijuana-Ensenada", el cual se desarrollará como sigue:

- Introducción.
- I.- Antecedentes Teóricos.
- II.- Análisis de Estabilidad y Presentación de las Alternativas de Solución Empleadas en los Deslizamientos.
- III.- Comportamiento a la Fecha de las Soluciones Adoptadas para Contener los Deslizamientos.
- Conclusiones.
- Bibliografía.

Asimismo fue designado como Asesor de Tesis el señor Ing. Fidel Serrano Lozano, profesor de esta Escuela.

Ruego a usted tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPERANZADO"
Acatlán, Edo. de Méx., a 1º de octubre de 1984


ING. HERMENEGILDO ARCOS SERRANO
Coordinador del Programa de
Ingeniería.
ENEP - ACATLAN
COORDINACION DEL
PROGRAMA DE INGENIERIA

I N D I C E

| | página |
|--|--------|
| PROLOGO | 1 |
| 1. INTRODUCCION | 3 |
| 1.1 Localización de las fallas | 3 |
| 1.2 Geología, tectónica y sismicidad de la península de Baja California | 3 |
| 1.3 Geología de la zona de fallas | 5 |
| 1.4 Estudios, exploraciones, mediciones e instrumentación | 6 |
| 1.5 Análisis de estabilidad | 7 |
| 2. ANTECEDENTES TEORICOS | 9 |
| 2.1 Definición de talud | 9 |
| 2.2 Mecanismos de falla | 9 |
| 2.3 Análisis de estabilidad de taludes | 12 |
| 2.3.1 Análisis de materiales friccionantes | 12 |
| 2.3.2 EL método sueco o de Fellenius | 13 |
| 2.3.3 Falla por traslación | 14 |
| 2.3.4 Análisis de estabilidad en superficies de falla compuestas | 14 |
| 2.3.5 Método de Taylor | 15 |
| 2.3.6 Método de Jambu | 16 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4 | Métodos para la corrección y prevención de fallas | 16 |
| 2.5 | Resistencia residual de los suelos | 20 |
| 3. | ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y PRESENTACION DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCION EMPLEADAS EN LOS DESGLIZAMIENTOS DE LOS KM 12+360 y 15+500 | 22 |
| 3.1 | Deslizamiento en el Km 12+360 | 22 |
| 3.1.1 | Descripción general | 22 |
| 3.1.2 | Exploraciones, instrumentación y mediciones | 23 |
| 3.1.3 | Análisis de estabilidad | 25 |
| 3.2 | Deslizamiento en el Km 15+500 | 33 |
| 3.2.1 | Descripción general | 33 |
| 3.2.2 | Exploraciones, instrumentación y mediciones | 33 |
| 3.2.3 | Análisis de estabilidad | 35 |
| 3.2.4 | Solución adoptada para contener el deslizamiento en el Km 15+500 | 36 |
| 4. | COMPORTAMIENTO DE LAS SOLUCIONES ADOPTADAS PARA CONTENER LOS DESGLIZAMIENTOS | 39 |
| | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 40 |
| | BIBLIOGRAFIA CONSULTADA | 44 |

PROLOGO

Los orígenes de este trabajo se encuentran en el interés despertado hacia mi por el análisis de estabilidad de taludes cuando estudiaba la carrera de ingeniero civil en la U.N.A.M. Desde que tuve mis primeros contactos con el tema me pareció sumamente engorroso el definir la estabilidad de un talud mediante tanteos. Posteriormente conocí los progresos realizados por Jambu, Taylor y Fellenius, los cuales, a pesar de todo, no resuelven el problema cuando se intenta investigar la estabilidad de un talud en suelos estratificados, de geometría irregular o con presiones de poro en su interior.

Quando tuve que elegir tema de tesis mi primera intención fue la de trabajar en la creación de rutinas de computadora que realizaran todos los cálculos aritméticos implicados de manera confiable y rápida.

Desafortunadamente me encontré con que ya existen tesis sobre el tema realizadas con anterioridad, ligeramente contrariado comenté el hecho con mis profesores en la escuela, los cuales me recomendaron en su mayoría, enfocar el tema desde otro ángulo, fue así como me enteré de los problemas que se tuvieron en la autopista Tijuana-Ensenada, conforme más profundizaba en el estudio más interesante me parecía, particularmente en lo referente al método de análisis empleado y sus simplificaciones, que influyen en el factor de seguridad calculado.

Motivado por la inquietud de realizar el análisis de un

caso concreto como el de la autopista Tijuana-Ensenada, evitando en lo posible hacer modificaciones y apoyándome en una herramienta como la computadora para el cálculo aritmético, decidí realizar el presente trabajo, cuyo objetivo específico es investigar y presentar las variaciones que sufre el valor de el factor de seguridad contra deslizamiento en superficies de falla compuestas, utilizando para el análisis el método de Terzaghi, considerando y despreciando interacción entre dovelas.

1.- INTRODUCCION

En esta introducción describiré de manera somera las características generales de la zona y de los deslizamientos, lo anterior es con el objeto de tener un panorama que permita una adecuada comprensión de las fallas. La información en detalle será tratada más adelante en los capítulos que integran este trabajo.

1.1. Localización de las fallas.

El tramo donde ocurren los deslizamientos se encuentra ubicada en el paralelo 32°N y el meridiano 116.8°W en el extremo nor-oeste de la península de Baja California, como se muestra en la figura 1.

Desde los primeros estudios geotécnicos realizados se observaron las trazas de deslizamientos antiguos en el tramo, por lo que se encontraba presente el peligro de que éstos pudieran reactivarse con la construcción de la autopista.

No obstante lo anterior se decidió correr el riesgo de construir la autopista debido a que ésta se diseñó como un camino de peaje destinado a desarrollar turísticamente la zona.

1.2. Geología, tectónica y sismicidad de la península de Baja California.

Los estudios geológicos realizados indican que la mitad norte de la península está formada por rocas ígneas intrusivas graníticas del cretácico, a ambos lados posee rocas sedimentarias y volcánicas con la excepción de la delta de el río Colorado formado

por depósitos aluviales.

El batolito granítico ocupa las cuatro quintas partes de la península existiendo en la superficie una cantidad regular de aparatos volcánicos y derrames de rocas ígneas con algunos manchones de rocas metamórficas.

Tectónicamente puede decirse que la península es un gran bloque fallado longitudinalmente por ambos lados e inclinado hacia el Océano Pacífico.

La zona de fallas se encuentra ubicada en una región afectada por actividad tectónica actual, el principal sistema de fallas es el de San Andrés que lleva una dirección NW-SE, sin embargo, existen otras fallas con patrones diferentes como la falla Agua Blanca y la falla San Miguel con rumbo NNW-SSE tal y como se observa en la figura 2.

La falla Agua Blanca tiene una longitud de más de 100 Km. y se tiene evidencia de que presenta actividad reciente, es importante por su cercanía a la zona de deslizamientos.

El sistema de fallas San Miguel se ubica a escasos Kilómetros de la zona de deslizamientos siguiendo un alineamiento sensiblemente paralelo a la costa.

Todas estas fallas se ha comprobado que son activas con un desplazamiento promedio de 0.50 cm. anual, como es fácil comprender su influencia sobre los deslizamientos es altamente nociva.

La península de Baja California se encuentra en una zona de intensa actividad sísmica. Debido a su extensión se ha dividido en cinco zonas como se observa en la figura 3.

La zona de fallas se ubica en la número cinco la cual es la de mayor sismicidad. Los sismos en esta zona son en su mayoría poco profundos y de magnitud elevada, no ocurren aisladamente sino en series en un mismo lapso de tiempo (horas o días).

1.3 Geología de la zona de fallas.

En el área de fallas entre los Kilómetros 12 y 21 es factible distinguir cuatro unidades geológicas como se muestra en la figura 4.

En la zona más elevada existe una mesa constituida por una corriente lávica de espesor variable que procede probablemente del cono cinerítico comprendido en el área marcada como Tp, el derrame cubre rocas como las lutitas, areniscas y conglomerados que forman la segunda unidad geológica. La tercera unidad consiste en suelos limo-arenosos que sobreyacen las unidades mencionadas. La cuarta unidad, adyacente a la costa está formada por depósitos de talud producto del intemperismo físico del derrame volcánico, cubren rocas sedimentarias del tipo de las lutitas, areniscas y conglomerados. En esta unidad se observaron claramente las marcas de los antiguos deslizamientos que por lo general coinciden con los que se presentan actualmente. Los depósitos de talud están constituidos principalmente por fragmentos angulosos de rocas que ocasionalmente tienen hasta 2 metros de diámetro empacados en suelos limo-arenosos sueltos. El espesor de los depósitos es variable alcanzando incluso los 35 metros. Su permeabilidad es muy alta y permite por tanto el paso del agua hasta las lutitas y areniscas que los subyacen.

Como datos complementarios debo agregar que la precipitación media anual fluctua entre 100 y 200 mm., el periodo de lluvias abarca de noviembre a marzo, el clima es de templado a frio y la variación máxima de la marea es de 3.41 metros con respecto al nivel medio del mar.

1.4 Estudios, exploraciones, mediciones e instrumentación.

Para el estudio de los deslizamientos se programaron exploraciones y mediciones cuyo propósito fue obtener información de los siguientes puntos:

- a) topografía de las masas en movimiento.
- b) dirección y magnitud de los desplazamientos superficiales.
- c) características geológicas particulares de los deslizamientos.
- d) forma y profundidad de las superficies de deslizamiento.
- e) condiciones hidráulicas del subsuelo.

Con respecto a la topografía de las masas en movimiento la configuración en planta de cada deslizamiento se determinó con base en: la trayectoria de las grietas superficiales y estableciendo líneas de puntos de control perpendiculares a la dirección de los movimientos referidas con respecto a un banco de nivel estable.

Para establecer la dirección y magnitud de los desplazamientos superficiales se tendieron líneas de colimación que permitieron obtener la componente horizontal de los movimientos, la componente vertical se obtuvo por nivelaciones directas respecto a bancos de nivel fijos.

Las características geológicas particulares de los deslizamientos

se establecieron con base en sondeos que permitieron definir la estratificación y naturaleza de los materiales en algunos puntos de la zona en movimiento, los sondeos se ubicaron en líneas paralelas a la dirección del movimiento a fin de determinar perfiles a usarse en los análisis de estabilidad. Las exploraciones realizadas no se diseñaron para obtener muestras inalteradas ya que ninguno de los materiales puede considerarse como representativo de la superficie de deslizamiento.

A fin de conocer la forma y profundidad de las superficies de deslizamiento se instalaron inclinómetros tipo slope-indicator alojados en perforaciones de 5.5 pulgadas de diámetro, los tubos de aluminio se empacaron en arena limpia bien graduada con objeto de utilizarlos para observar el N.A.F.

Se instalaron estaciones piezométricas en los deslizamientos a efecto de medir la presión de poro en exceso de la hidrostática, los datos obtenidos mostraron que ésta es muy pequeña y el nivel medido en los piezómetros coincide con el nivel de los inclinómetros.

1.5 Análisis de estabilidad.

Debido a que se trataba de superficies de deslizamiento previamente formadas y con desplazamientos grandes el criterio adoptado para estimar los parámetros de resistencia del suelo fue el de Skempton, conforme al cual:

$$S_r = \bar{\sigma} \tan \phi_r$$

S_r = Resistencia al corte residual

$\bar{\sigma}$ = Esfuerzo normal efectivo.

ϕ_r = Angulo de resistencia residual.

Utilizando el método desarrollado por Terzaghi se aceptó que el factor de seguridad inicial era igual a la unidad lo que permitió determinar analíticamente la resistencia al corte medio a lo largo de las superficies de deslizamiento como se verá posteriormente.

2.- ANTECEDENTES TEORICOS .

Con estos antecedentes teóricos no pretendo mostrar una visión exhaustiva del estado del conocimiento en el arte de diseñar taludes, mi interés consiste fundamentalmente en realizar una revisión ligera de conceptos y métodos que me serán útiles posteriormente en esta tesis.

2.1 Definición de talud.

Se define como talud a la superficie inclinada con respecto a la horizontal que adoptará de manera provisional o permanente una estructura de tierra. Se suele hacer la distinción entre los taludes naturales o laderas y los taludes artificiales o cortes y terraplenes.

Generalmente se considera a los taludes como la estructura térrea mas compleja ya que las condiciones necesarias para la aplicación de cualquier método de análisis al límite disponible sólo se dan en contadas ocasiones, y si agregamos a ello que el estado de esfuerzos en el interior de un talud no se puede determinar actualmente es fácil verificar la validez de la afirmación anterior.

2.2. Mecanismos de falla.

Los mecanismos de falla factibles de presentarse en un talud son numerosos y dependen de distintos factores, por lo común sólo algunos de éstos admiten tratamiento matemático y los demás deben apoyarse en la experiencia del proyectista o constructor.

En la siguiente tabla se presentan los principales mecanismos de falla identificados a la fecha:

| Tipo de falla | Casos en que se presenta | Características |
|--------------------------------------|--|---|
| Deslizamiento superficial (CREEP) | Laderas naturales | <p>Consiste en un movimiento continuo y lento que se presenta en la zona superficial de algunas laderas. Afecta a grandes áreas y no se puede hablar de una superficie definida de falla.</p> <p>No se conocen con certeza las causas del CREEP pero algunos experimentos indican que podría deberse a cargas pequeñas actuando largo tiempo pueden producir grandes deformaciones en algunos suelos.</p> |
| Flujos | Laderas naturales | <p>Son movimientos del suelo similares a los de un líquido viscoso. No se forma una superficie de falla definida. Su velocidad varía mucho puede ser muy lenta o muy alta. Se suele distinguir flujos de dos tipos: En materiales secos como rocas locss y arenas, y en materiales húmedos.</p> |
| Licuación | Terraplenes cortes y laderas naturales | <p>Se conoce como licuación a la súbita pérdida de resistencia al esfuerzo cortante como resultado de un incremento intempestivo en la presión de poro lo que produce que el cuerpo del talud pase rápidamente de un estado firme a un estado casi líquido. Puede producirse por un sismo, una explosión o una acción dinámica rápida. Por lo general ocurre en arenas finas sueltas, arenas limosas o arcillas marinas que han sufrido lavado.</p> |

Erosión
Tubificación
y
agrietamiento

Terraplenes
cortes y
laderas
naturales

Estas fallas tienen en común que ocurren independientemente de la resistencia al corte del suelo.

La erosión consiste en el arrastre de material de la cara externa del talud por agentes tales como el agua y el viento.

La tubificación se produce cuando el terraplén embalsa agua durante largo tiempo y se produce un flujo de agua a su través.

Las fallas por agrietamiento ocurren tanto longitudinal como transversalmente, las más importantes son las primeras ya que alcanzan longitudes de centenares de metros, su origen estriba en diferencias de humedad en el cuerpo del talud.

Fallas por
deslizamiento
a lo largo de
superficies
pre-existentes

Laderas
naturales

Consisten en deslizamientos lentos a lo largo de una superficie de falla previamente formada la cual se reactiva debido a la acción perturbadora del ingeniero.

Traslacional

Terraplenes
cortes y
laderas
naturales

Es un movimiento lineal importante que afecta a masas considerables de suelo en el talud. Ocurre a lo largo de superficies esencialmente planas asociadas a estratos poco resistentes.

Rotacional

Terraplenes

Se designa con este nombre a los movimientos rápidos que ocurren en masas importantes de un talud con una superficie de falla definida - que resulta ser muy similar a un arco de circunferencia en un plano perpendicular al talud.

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| Fallas con superficie compuesta | Terraplenes cortes y laderas naturales | Este tipo de falla abarca movimientos en los que se combinan la traslación y la rotación dando origen a superficies compuestas en las que existen tramos curvos asimilables a una circunferencia y tramos rectos planos. |
| Múltiple | Terraplenes cortes y laderas naturales | Se llama falla múltiple a aquella que se produce en varias superficies de deslizamiento ya sean simultáneas o en rápida sucesión. Se dividen en sucesivas y regresivas. |
| Derrumbes y caídos | Cortes y laderas naturales | Los derrumbes y caídos son típicos de laderas naturales y cortes. Por lo general consisten en desprendimientos locales que ruedan hacia abajo por su peso propio. Es imposible hablar de una superficie de falla y el colapso está predeterminado por las discontinuidades existentes. |

2.3 Análisis de estabilidad de taludes.

Aunque son contadas las fallas que admiten tratamiento matemático existen varias alternativas de análisis a disposición del ingeniero proyectista entre las que destacan las mostradas a continuación.

2.3.1 Análisis de materiales friccionantes.

La estabilidad de un talud formado por arenas limpias y homogéneo con su terreno de cimentación puede garantizarse si se cumple la siguiente desigualdad:

$$\tan \beta < \tan \phi$$

β = Angulo de inclinación del talud.

ϕ = Angulo de fricción interna

Es interesante notar que la estabilidad es independiente de la altura de el talud.

2.3.2 El método sueco o de Fellenius.

Desarrollado para aplicarse a todo tipo de geometrías y condiciones estratigráficas presupone que la superficie potencial de falla es cilíndrica tal que al realizarse una sección transversal producirá un segmento circular lo que permite analizar la estabilidad de manera sencilla.

En suelos puramente cohesivos el factor de seguridad se expresa como:

$$F. S. = \frac{c L R}{W d}$$

Las variables involucradas se ilustran en la figura 5.

En suelos cohesivo-friccionantes el factor de seguridad se expresa como:

$$F. S. = \frac{\sum [c_b + (W_a + W_b - u_b) \tan \phi]}{\sum (W_a + W_b) \sin \alpha}$$

$$m_{\alpha} = \frac{(1 + \tan \alpha \tan \phi) \cos \alpha}{F.S.}$$

Como se ilustra en la figura 6.

2.3.3 Falla por traslación.

El factor de seguridad contra falla por traslación se expresa como:

$$F.S. = \frac{F + P}{P_a}$$

tal como se muestra en la figura 7.

2.3.4 Análisis de estabilidad en superficies de falla compuestas.

De acuerdo a Terzaghi el factor de seguridad contra deslizamiento en este tipo de falla vale:

$$F.S. = \frac{\sum (cb + (W_a + W_b + \Delta t_n - ub) \tan \phi) (a/m_{\alpha})}{\sum (W_a + W_b)x - \sum [W_a + W_b + \Delta t_n + (ub \tan \phi - cb) \tan \alpha]} \frac{f}{m_{\alpha}}$$

como puede verse en la figura 8.

2.3.5 Método de Taylor

Taylor realizó una importante cantidad de trabajo tendiente a evitar los tediosos tanteos al ingeniero proyectista, desafortunadamente su método padece las siguientes limitaciones:

- El talud es homogéneo en si mismo y con su terreno de cimentación.
- El talud es de geometría regular.
- No existen presiones de poro en la masa de suelo.

En estas condiciones se define al factor de seguridad en términos de el número de estabilidad expresado como:

$$N_e = \frac{\gamma H c}{c}$$

obtenido de la figura 9, así el factor de seguridad vale:

$$F.S. = \frac{N_e c}{\gamma_m H}$$

2.3.6 Método de Jambu.

Jambu expresa el factor de seguridad como:

$$F.S. = N_e \frac{C}{\gamma_m H}$$

N_e se denomina número de estabilidad y puede obtenerse de la figura 10 a condición de conocer el parámetro:

$$\lambda_{\phi} = \frac{\gamma H}{c} \tan \phi$$

El método de Jambu desafortunadamente sufre las mismas limitaciones que el método de Taylor. Es obvio que existe una gran cantidad de métodos adicionales para revisar la estabilidad de un talud tanto en suelos como en rocas, pero dado que no es mi objetivo la presentación de los mismos no profundizaré en ellos.

2.4 Métodos para la corrección y prevención de fallas.

La experiencia acumulada en el campo de la geotécnica y particularmente en la mecánica de suelos ha permitido desarrollar diversos métodos para la corrección y prevención de fallas entre los que destacan:

| Nombre | Tipo de método | Descripción |
|------------------------------|-------------------------|--|
| Elusión | Preventivo | Se designa con este método al simple hecho de evitar la zona potencial de fallas ya sea en su totalidad o en su mayor parte. |
| Excavación | Correctivo | Consiste en el retiro de material inestable o nocivo para la estabilidad del talud. Puede abarcar rangos muy amplios desde el descopete hasta una remoción total de material. Como es claro sólo se usa para corregir fallas y no para prevenir las. |
| Abatimiento de taludes | Correctivo y Preventivo | Una de las soluciones más socorridas a fin de mejorar las condiciones de estabilidad de un talud, pero como todas, no es de alcance universal. Se recomienda especialmente su uso en materiales friccionantes ya que en suelos cohesivos existen alternativas mejores. |
| Empleo de materiales ligeros | Preventivo | El empleo de materiales ligeros es con el objetivo de reducir las fuerzas motoras, su efectividad es notoria en terraplenes apoyados sobre suelos cohesivos, ya que en los friccionantes su uso no es ventajoso. Se debe realizar una selección adecuada de los materiales a emplear ya que estos no deben degradarse con la compactación. |

| | | |
|---|-------------------------------|---|
| Bermas y escalonamientos | Preventivo y correctivo | Se define como berma a la masa de material térreo que se adhiere a un talud a fin de mejorar su estabilidad. |
| Empleo de materiales estabilizantes | Preventivo y correctivo | El escalonamiento se hace con dos fines: en suelos cohesivos reducir la altura de el talud, en suelos friccionantes reducir la inclinación a fin de evitar la erosión excesiva. |
| Contrapesos al pie de la falla | Correctivo | Este tipo de alternativas son costosas, provisionales y de uso limitado, consisten en añadir al suelo sustancias tales como: cementos, asfaltos, sales químicas, gases calientes etc. a fin de mejorar sus características mecánicas. |
| Estructuras de retención | Correctivo y preventivo | Consiste en colocar una cantidad suficiente de tierra o rocas al pie de una falla con el fin de aumentar las fuerzas resistentes. Para su uso se requiere una falla tipo rotacional y que el suelo no colapse bajo el peso de el material colocado. |
| Explosivos | Preventivo y correctivo | Este otro método ampliamente utilizado tanto para corregir como para prevenir deslizamientos es de funcionamiento evidente, sin embargo ha sido causa de numerosos problemas debido a su empleo de manera negligente. |
| | | Su uso se recomienda en aquellas superficies de falla muy lisas que pueden formarse entre un estrato duro y suelo a fin de aumentar la rugosidad de dicha superficie. Su empleo debe ser vigilado por personas experimentadas a fin de evitar daños más graves que el deslizamiento original. |

| | | |
|-------------------------------|-------------------------------|--|
| Pilotes | Correctivo | Método apropiado para emplearse en deslizamientos superficiales en suelos duros. Consiste en colocar dos o tres hileras de pilotes para frenar un movimiento instalándose hileras sucesivas a medida que los movimientos vuelven a producirse.. |
| Vegetación | Preventivo y correctivo | La vegetación para estabilizar taludes se emplea fundamentalmente con dos objetivos: disminuir la erosión superficial y abatir los contenidos de humedad en las capas superficiales de suelo. |
| Trincheras estabilizadoras | Correctivo | Solución que consiste en la remoción de material y en su sustitución por uno de mejor calidad. En México se ha usado con dos fines: Eliminación de agua en aquellas laderas cuya estabilidad es crítica debido al flujo de agua y sustitución por un material con excelentes características mecánicas que incrementa las fuerzas resistentes. |
| Drenes | Preventivo y correctivo | Son perforaciones de 5-10 cm. de diámetro con longitudes hasta de 100 metros realizadas perpendicularmente a la vía con una pendiente promedio de el 10%, su objetivo es drenar el agua intersticial, abatir las presiones de poro y modificar de manera favorable la red de flujo. |
| Galerfias filtrantes | Correctivo | Alternativa de estabilización usada con fines correctivos, consiste en un túnel de sección adecuada diseñado para captar el agua subterránea y abatir presiones de poro. Se utiliza cuando el agua se encuentra a una profundidad tal que hace imposible o antieconómico realizar excavaciones a cielo abierto. |

2.5 Resistencia residual de los suelos.

El fenómeno de la resistencia residual de los suelos se presenta en la naturaleza en aquellas superficies de falla previamente formadas. Puede reproducirse en el laboratorio en una prueba drenada y lenta que permita una disipación total de las presiones de poro, si este es el caso, observaremos que conforme avanza la prueba se va utilizando la resistencia al esfuerzo cortante disponible del suelo hasta llegar a un máximo (peak) donde se detiene el ensaye, pero, si se continua la prueba se nota que a mayores desplazamientos la resistencia decrece a un valor practicamente constante llamado resistencia residual como se observa en la figura 11.

De la figura anterior se deduco:

$$S = c + \bar{\sigma} \tan \phi$$

$$S_r = C_r + \bar{\sigma} \tan \phi_r$$

Se ha observado que:

$$C_r \doteq 0 \quad \Rightarrow$$

$$S_r = \bar{\sigma} \tan \phi_r$$

De acuerdo a Skempton el fenómeno podría deberse a que en un principio las hojuelas de arcilla se encuentran orientadas al azar y cuando se alcanza la resistencia residual las mismas se encuentran orien-

tadas de acuerdo al plano de falla en la vecindad de éste.

En cuanto a la obtención de la resistencia residual en el laboratorio es un problema delicado que no admite recetas o procedimientos estandarizados, pese a lo anterior generalmente se utilizan dos métodos para determinarla: Las pruebas de corte directo y las pruebas de torsión.

Las pruebas de corte directo consisten en someter al espécimen a varios ciclos de desplazamiento hacia ambos lados hasta llegar a la resistencia residual.

Las pruebas de torsión consisten en someter el suelo a giro en unas donas de material labradas directamente en los anillos de el equipo de prueba lo que permite llegar mas allá de la resistencia máxima.

3.- ANALISIS DE ESTABILIDAD Y PRESENTACION DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCION EMPLEADAS EN LOS DESLIZAMIENTOS DE LOS Km.

12+360 y 15+500

Debido a que las fallas en la zona de deslizamientos presentan todas las mismas características en cuanto a geología, estratigrafía y mecanismo de falla considero absurdo el intentar describir todos y cada uno de los deslizamientos, en lugar de ello me limitaré a el análisis de los problemas presentados en los Km. 12+360 y 15+500 que considero como típicos.

Conforme al proyecto de la autopista fue necesario hacer cortes en la lutitas y areniscas y construir terraplenes sobre los depósitos de talud, el comportamiento de los cortes ha sido satisfactorio mas no así los terraplenes que han afectado la estabilidad precaria de los antiguos deslizamientos.

3.1 Deslizamiento en el Km. 12+360.

3.1.1 Descripción general.

Debido al trazo de la autopista esta falla se localizó muy cerca del mar, en general los materiales encontrados fueron derrames andesíticos, depósitos de talud y lutitas interestratificadas con areniscas.

En la figura 12 se muestra una planta de la falla, en la que pueden verse las grietas perimetrales de los deslizamientos locales, las líneas de control superficiales y la localización de los inclinómetros utilizados para definir la superficie de deslizamiento.

En las figuras 13, 14, 15 se muestran las estratigrafías encontradas en las secciones A, C, E en base a las perforaciones hechas para alojar los inclinómetros.

3.1.2 Exploraciones, instrumentación y mediciones.

Debido a las fuertes deformaciones sufridas por el muro que se construyó para contener el terraplén en octubre de 1967 se iniciaron los trabajos de estudio consistentes en:

a) Se tendieron cinco líneas de control superficial a fin de observar los desplazamientos del camino.

b) Se instalaron un total de doce inclinómetros.

Con base en las perforaciones hechas para alojar los inclinómetros fue posible obtener muestras y definir la superficie de deslizamiento, esta información se muestra en las figuras 16, 17, 18.

En la tabla I aparecen anotados el inclinómetro, la profundidad de la superficie de deslizamiento y los materiales en que se encontró ésta.

T A B L A I

| Inclinómetro | Profundidad de la superficie de deslizamiento | Materiales encontrados |
|--------------|---|---|
| I-1 | 15.80 m. | Areniscas, conglomerados con capas de lutita. |
| I-2 | 20.40 m. | Areniscas con capas de lutita. |

| | | |
|------|----------|---|
| I-3 | 9.90 m. | Contacto de depósitos de talud con areniscas. |
| I-4 | 13.80 m. | Contacto de terraplén con areniscas |
| I-5 | 6.50 m. | Depósitos de talud. |
| I-6 | 9.80 m. | Contacto de depósitos de talud con areniscas. |
| I-7 | 14.80 m. | Areniscas con capas de lutita. |
| I-8 | ----- | No definida |
| I-9 | 8.90 m. | Areniscas con capas de lutita. |
| I-10 | ----- | Destruído |
| I-11 | 21.00 m. | Arenicas con capas de lutita. |
| I-12 | 9.60 m. | Contacto de depósitos de talud con lutitas alteradas. |

Los movimientos más conspicuos para las líneas de puntos de control 1,2, M se muestra en las figuras 19,20,21.

Debido a los alarmantes desplazamientos y al estado crítico de la cimentación del muro por la acción erosiva del mar se decidió instalar un pedraplén de 150 m. en la base del muro así como la perforación de 10 drenes de penetración transversal con longitud promedio de 60 m. cada uno. A pesar de lo anterior los movimientos prosiguieron y por ello se estudió más atentamente la información de los instrumentos colocados en la falla obteniéndose las siguientes conclusiones:

a) Las superficies de deslizamiento son circulares en algunas secciones y conchadas en otras.

b) Las velocidades de deslizamiento eran cíclicas, incrementándose después de la época de lluvias.

3.1.3 Análisis de estabilidad.

En septiembre de 1970 los ingenieros de la entonces S.O.P, decidieron estabilizar el deslizamiento con una medida que se creyó definitiva, la remoción de material en la zona comprendida entre la línea de control cuatro y la autopista como se muestra en la figura 12.

Como los desplazamientos ocurridos eran grandes y sobre una superficie de falla previamente formada se consideró que la resistencia de la masa al esfuerzo cortante era la residual, para determinar el valor de el ángulo de fricción interna residual se supuso que:

$$F.S. = 1.0$$

El factor de seguridad contra deslizamiento era igual a la unidad. Como la forma de la superficie de falla es compuesta se utilizó el método de Terzaghi, considérese la superficie de falla de la figura 22,

El equilibrio de la masa con respecto al polo "O" requiere que:

$$\sum Wx = \sum (Sa + Pf) + 1/2 \gamma_w d^2 a_1$$

$$S = t \cdot l = \frac{l}{F.S.} (cl + p' \tan \phi)$$

$$\Sigma (W_a + W_b + z_b \gamma_w) x =$$

$$\frac{1}{F.S.} \Sigma (c l + P' \tan \phi) a + \Sigma P f + 1/2 \gamma_w d^2 a_1$$

$$F.S. = \frac{\Sigma (c l + P' \tan \phi) a}{\Sigma (W_a + W_b + z_b \gamma_w) x - \Sigma P f - 1/2 \gamma_w d^2 a_1} \quad (1)$$

Como el agua por debajo de A-A' se encuentra en equilibrio:

$$\Sigma z_b \gamma_w x - 1/2 \gamma_w d^2 a_1 = \Sigma z l \gamma_w f = \Sigma (P - P_1) f$$

$$P_1 = P - z l \gamma_w$$

$$F.S. = \frac{\Sigma (c l + P' \tan \phi) a}{\Sigma (W_a + W_b) x - P_1 f} \quad (2)$$

Sí hacemos la suma de fuerzas verticales en el polígono de fuerzas mostrado:

$$W_a + W_b + \Delta t_n + z_b \gamma_w =$$

$$z_1 \gamma_w \cos \alpha + (P' + u_1) \cos \alpha + \frac{1}{F.S.} (c_1 + P' \tan \phi) \sin \alpha$$

$$P' = \frac{W_a + W_b + \Delta t_n - u_b - (c/F.S.) b \tan \alpha}{m_\alpha} \quad (3)$$

$$m_\alpha = \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right) \cos \alpha$$

De el polígono de fuerzas:

$$P_1 = -P' + u_1 =$$

$$\frac{W_a + W_b + \Delta t_n + (1/F.S.) (u_b \tan \phi - cb) \tan \alpha}{m_\alpha} \quad (4)$$

Sustituyendo 3, 4 en 2:

$$F.S. = \frac{\sum [cb + (W_a + W_b + \Delta t_n - u_b) \tan \phi] (a/m_\alpha)}{\sum (W_a + W_b) x - \sum [W_a + W_b + \Delta t_n + (u_b \tan \phi - cb) \tan \alpha] \frac{f}{F.S.}} \frac{f}{m_\alpha} \quad (5)$$

Si suponemos que $\Delta t_n \neq 0$, $\Delta E_n \neq 0$ debe satisfacerse para to la masa:

$$\sum \Delta t_n = 0 \quad (6)$$

$$\sum \Delta E_n + 1/2 \delta w d^2 = 0 \quad (7)$$

Si resolvemos las fuerzas en la dirección S obtenemos:

$$S = \Delta E_n \cos \alpha + (W_a + W_b + \Delta t_n + z b \delta w) \operatorname{sen} \alpha \quad (8)$$

$$\Delta E_n = S \sec \alpha - (W_a + W_b + \Delta t_n) \tan \alpha - z b \delta w \tan \alpha \quad (9)$$

Además se puede observar en el polígono de fuerzas:

$$S = [1/F.S.] (c1 + P' \tan \phi) \quad (10)$$

Sustituyendo 3 en 10

$$S = \frac{cb + (W_a + W_b + \Delta t_n - ub) \tan \phi}{F.S. \quad m_\alpha} = \frac{M}{F}$$

Sumando para todas las dovelas

$$\sum [\Delta E_n + z b \delta w \tan \alpha] =$$

$$\sum [(M/F.S.) \sec \alpha - (W_a + W_b + \Delta t_n) \tan \alpha]$$

pero

$$\sum z b \gamma_w \tan \alpha = 1/2 \gamma_w d^2$$

$$\sum [(M/F.S.) \sec \alpha - (W_a + W_b + \Delta t_n) \tan \alpha] = 0 \quad (11)$$

luego entonces debe determinarse un conjunto razonable de E_n , t_n que satisfaga las ecuaciones 6, 11 para resolver el problema y determinar el factor de seguridad.

Debe notarse que la inclusión de fuerzas cortantes convierte al problema en uno indeterminado el cual acepta muchas soluciones coherentes con el marco proporcionado por la mecánica de suelos. en vista de lo anterior al efectuarse los análisis de estabilidad originales se decidió despreciar la interacción entre dovelas con lo que se obtiene:

$$F.S. = \frac{\sum [(W_a + W_b) \tan \phi_r] (a/m_\alpha)}{\sum (W_a + W_b) x - \sum [(W_a + W_b) (E/m_\alpha)]} = 1.00$$

$$Si \quad c_r = 0$$

$$u = 0$$

Como todas las magnitudes que intervienen en la ecuación anterior

son conocidas con excepción de el ángulo de fricción interna residual es factible:

$$\tan \phi_r = \frac{\sum (W_a + W_b) x - \sum (W_a + W_b) (f/m_\alpha)}{\sum (W_a + W_b) (a/m_\alpha)}$$

obteniéndose los siguientes resultados:

| Sección | ϕ_r sop |
|---------|--------------|
| A | 11.60° |
| C | 13.30° |

Complementariamente se realizaron pruebas de laboratorio cuyos resultados se muestran en las figuras 23, 24 y 25 y que arrojaron los siguientes resultados:

| Sección | ϕ_r lab |
|---------|--------------|
| A | 10.0° |
| C | 12.24° |

Con el propósito de investigar la variación de el factor de seguridad al considerar interacción entre dovelas realizé nuevamente los análisis de estabilidad.

La observación de la ecuación (5) permite saber que la determi-

nación de el factor de seguridad es un proceso iterativo, por ello me vi obligado a utilizar una computadora, para tal fin diseñé un programa que cumpliera con las condiciones de equilibrio fijadas por las ecuaciones (6), (10), en estas condiciones el diagrama de flujo para resolver el problema es el mostrado en la figura 26.

El listado del programa se muestra en la figura 27, fue corrido en una microcomputadora Apple II-e y los datos usados en él fueron obtenidos de las figuras 16, 17, 18 las cuales se obtuvieron a partir de la instrumentación en campo.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

| Sección | ϕ_r | N.F.S.* |
|---------|----------|---------|
| A | 14.74° | 1.001 |
| C | 23.86° | 1.00 |
| E | 8.59° | 1.11 |

en la tabla II se muestra el total de información recabada al aplicar las dos variantes de el método de Terzaghi.

T A B L A I I

| Sección | ϕ_{rsop} | ϕ_r lab. | ϕ_r | F.S.I.** | N.F.S.* |
|---------|---------------|---------------|----------|----------|---------|
| A | 11.60° | 10.0° | 14.74° | 1.00 | 1.001 |
| C | 13.30° | 12.24° | 23.86° | 1.17 | 1.00 |
| E | ----- | ----- | 8.59° | 1.50 | 1.11 |

* N.F.S.= Nuevo factor de seguridad

** F.S.I.= Factor de seguridad inicial

Puede notarse que la dispersión de el ángulo de fricción interna residual de el método simplificado es menor que la del método de Terzaghi lo que sugiere que éste es muy sensible en sus variaciones de el ϕ_r con respecto a los distintos Δt_n factibles que pudiesen proponerse.

Asimismo es notoria la baja en los factores de seguridad obtenidos aplicando el método de Terzaghi con respecto al método simplificado empleado por la S.O.P. , la pregunta obvia sería ¿ Cuánto se modifica el N.F.S. para dos conjuntos de fuerzas cortantes Δt_n que satisfagan el marco teórico proporcionado por la mecánica de suelos en un mismo deslizamiento? ésta pregunta intentará responderse más adelante.

3.2 Deslizamiento en el Km. 15 + 500.

3.2.1. Descripción general.

Constituye uno de los más importantes debido a que su área en planta es de aproximadamente 8 hectáreas, se encuentra separado por dos contrafuertes de lutita de las fallas más cercanas que son: la de los Kms. 16 + 000 y 15 + 200.

Sobre el talweg cubierto por depósitos de talud permeables se construyó el terraplén para la autopista con una altura promedio de 17.0 m. los depósitos de talud registraron espesores de hasta 37.0 m. los cuales descansan a su vez sobre lutitas que afloran a los lados en los cortes realizados y en algunos lugares a la orilla del mar, es notoria la ausencia de conglomerados.

En la figura 28 se muestra una planta del deslizamiento en la que se ilustran las grietas perimetrales, las líneas de puntos de control y la ubicación de los inclinómetros.

La estratigrafía encontrada en las secciones 2,4,6, se muestra en las figuras 29, 30, 31 respectivamente.

3.2.2. Exploraciones, instrumentación y mediciones.

Se trazó la retícula indicada en la figura 28, en los puntos de intersección se localizaron los inclinómetros, los sondeos de exploración y los puntos de control superficial. Con base en la información obtenida de los inclinómetros fue posible definir la profundidad de la superficie de deslizamiento, ésta se muestra en las figuras 32, 33, 34. En la tabla III se muestra el inclinómetro, la profundidad de la

superficie de deslizamiento y los materiales en que se desarrolló ésta.

T A B L A I I I

| Inclinómetro | Profundidad de la superficie de deslizamiento | Materiales encontrados |
|--------------|---|---|
| IA2 | 12.00 m. | Contacto de lutita alterada con lutita sana. |
| IA4 | 4.50 m. | Lutita alterada. |
| IA6 | 9.50 m. | Depósitos de talud. |
| IB2 | 19.20 m. | Lutita alterada. |
| IB4 | 36.00 m. | Lutita sana. |
| IB6 | 17.30 m. | Contacto de depósitos de talud con lutita alterada. |
| IC2 | 16.20 m. | Contacto de depósitos de talud con lutita alterada. |
| IC4 | 36.90 m. | Contacto de depósitos de talud con lutita alterada. |
| IC6 | 10.10 m. | Contacto de depósitos de talud con lutita alterada. |
| IC7 | 5.50 m. | Depósitos de talud. |
| IK7 | 13.40 m. | Lutita alterada. |
| IK8 | 9.60 m. | Lutita alterada. |
| IK9 | 8.00 m. | Contacto de depósitos de talud con lutita alterada. |
| IK10 | 13.00 m. | Lutita alterada. |
| IQ1 | 12.60 m. | Contacto de lutita alterada con lutita sana. |

IF4 7.00 m. Lutita alterada

Los inclinómetros IA2, IA6 corresponden a fallas locales causadas por erosión marina que no forman parte del deslizamiento.

Debido a la enorme magnitud del mismo en el punto IP1 localizado en el contrafuerte de lutita ya mencionado y que separa los deslizamientos de los Km 15+500 y Km 15+200 se exploró el subsuelo hasta 100 m. de profundidad y se instaló un inclinómetro a 65 m. de profundidad, con base en lo anterior se concluyó que no existen a esa profundidad otro tipo de rocas que no sean las sedimentarias y que el contrafuerte de lutita no se mueve.

Los movimientos más conspicuos de las líneas de puntos de control A,B,C,Q,H se muestran en las figuras 35 a 39 inclusive respectivamente.

3.2.3. Análisis de estabilidad

Con base en consideraciones completamente análogas a las anteriormente mencionadas los ingenieros de la S.O.P. determinaron el ángulo de fricción interna residual para las secciones 4 y 6 obteniendo los siguientes resultados:

| Línea | $\phi_{r\text{ sop}}$ |
|-------|-----------------------|
| 4 | 7.1° |
| 6 | 13.2° |

Así mismo se realizaron ensayos de laboratorio en muestras representativas con los siguientes valores:

| Línea | $\phi_{r\text{lab}}$ |
|-------|----------------------|
| 4 | 6.5° |
| 6 | 8.0° |

Las curvas de esfuerzo-deformación de las figuras 40 y 41 se obtuvieron con base en los ensayos anteriores, en la figura 42 se muestra la envolvente de Mohr producto de las pruebas de corte directo.

Para realizar los análisis de estabilidad se emplearon las secciones mostradas en las figuras 32, 33 y 34 obtenidas a partir de la instrumentación en campo.

Ahora se presentarán los resultados arrojados por el programa de computadora considerando interacción entre dovelas, empezando por el ángulo de fricción interna residual.

| Línea | ϕ_r (Terzaghi) |
|-------|---------------------|
| 2 | 26.67° |
| 4 | 8.57° |
| 6 | 16.50° |

Los nuevos factores de seguridad son:

| Línea | N.F.S. |
|-------|--------|
| 2 | 0.997 |
| 4 | 1.20 |
| 6 | 1 |

En la tabla IV se condensan todos los resultados obtenidos:

| Sección | T A B L A I V | | | | |
|---------|---------------|---------------|----------|--------|--------|
| | ϕ_{rsop} | ϕ_{rlab} | ϕ_r | F.S.I. | N.F.S. |
| 2 | -- | -- | 26.67° | 1.06 | 0.997 |
| 4 | 7.1° | 6.5° | 8.57° | 1.06 | 1.20 |
| 6 | 13.2° | 8.0° | 16.50° | 1.15 | 1.00 |

Nuevamente se ve que el ángulo de fricción interna residual arrojado por el programa no es más valioso que el obtenido con el método simplificado, probablemente se debe a que dicho ángulo es muy sensible a los cambios entre los distintos conjuntos de fuerzas cortantes que admite el problema para su solución, afortunadamente los cálculos realizados en el deslizamiento del Km. 16 + 800 mostraron que el factor de seguridad calculado sufre variaciones muy pequeñas ante los distintos conjuntos de fuerzas mencionados, como se expone más adelante.

3.2.4. Solución adoptada para contener el deslizamiento en el Km. 15 + 500.

El proceso de selección de la solución en el Km. 15 + 500 es muy interesante ya que ilustra el criterio que puede emplearse para escoger una entre varias alternativas.

En el estudio de estabilización se analizaron las alternativas siguientes:

- a) Obras de subdrenaje bajo la superficie de deslizamiento.
- b) Empleo de contrapeso al pie de la falla.
- c) Abatimiento de la rasante de el camino para reducir las fuerzas motoras.
- d) Desplazamiento de el camino ladera arriba.
- e) Eliminación de carga en la cabeza de la falla.
- f) Combinación de dos o más alternativas.

Para la alternativa a se consideró que el subdrenaje modifica los pesos volumétricos, elimina la subpresión y las fuerzas de filtración en toda la superficie sumergida.

La alternativa b se consideró muy sugestiva pero cuando comenzó a construirse se manifestaron fallas locales que impidieron llevarla adelante.

Las alternativas c y d no se consideraron seriamente debido a su alto costo.

Finalmente se opto por una combinación de las alternativas a, e consistente en:

- Construcción de una galería filtrante de 240 metros de longitud como se muestra en la figura 28.

- El retiro de aproximadamente $25\ 000\ m^3$ de depósitos de talud localizados entre el camino y la grieta perimetral superior.

4.- COMPORTAMIENTO DE LAS SOLUCIONES ADOPTADAS PARA
CONTENER LOS DESLIZAMIENTOS.

Todos los análisis y alternativas de solución presentados corresponden a intentos de resolver el problema realizados por la S.O.P. hace aproximadamente 15 años, posteriormente se han realizados otros con poco éxito.

La información disponible más reciente sobre los movimientos horizontales diarios en promedio es la siguiente:

| Kms. | Desplazamiento horizontal promedio diario en mm. |
|----------|---|
| 12 + 360 | 10.54 |
| 15 + 500 | 1.07 |
| 15 + 600 | 0.24 |
| 16 + 000 | 2.00 |
| 16 + 900 | 24.00 |
| 19 + 300 | 1.80 |
| 20 + 415 | 0.60 |
| 20 + 500 | 0.40 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones generales:

El problema de los deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada no ha sido resuelto.

Personalmente opino que esto se debe a la gran complejidad intrínseca de los siguientes factores implicados en el problema:

- La tectónica de la parte norte de la Península.
- La alta sismicidad de la zona.
- La existencia de superficies de falla previamente formadas.
- Las propiedades mecánicas de las lutitas y areniscas depositadas en un medio marino, sujetas a lavado posteriormente cuando emergieron, lo que ocasionó cambios importantes en su resistencia al esfuerzo cortante.

Estos factores son de naturaleza tal que los modelos matemáticos con que disponemos actualmente no permiten representarlos objetivamente, lo cual afecta negativamente los resultados obtenidos.

Conclusiones particulares:

Con base en el método de análisis adoptado en este trabajo y de acuerdo con los resultados obtenidos que se reportan en la tabla V se puede concluir lo siguiente:

- Si se desea calcular el factor de seguridad contra deslizamiento en superficies de falla compuestas es más realista con-

siderar interacción entre dovelas.

- El valor del ángulo de fricción interna calculado analíticamente no es confiable dada la gran sensibilidad del modelo matemático ante los distintos conjuntos de fuerzas cortantes que cumplen con las condiciones de la estática y que son coherentes con el marco teórico proporcionado por la mecánica de suelos. Por lo cual para calibrar los resultados del modelo matemático y así obtener resultados confiables, es necesario usar los valores del ángulo de fricción interna que se obtengan del mismo, que sean compatibles con los valores al respecto obtenidos de las pruebas de campo o laboratorio

R E C O M E N D A C I O N E S

- Para resolver el problema de los deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada se recomienda realizar estudios geotécnicos de amplio alcance que permitan estimar la extensión total de los materiales potencialmente peligrosos en cuanto a la formación de nuevas superficies de falla, con base en esta información podría intentarse predecir no solo la posición de nuevas superficies de falla sino además su configuración más probable en corte.

Lo anterior permitiría eludir localmente o en su caso tomar las medidas preventivas más adecuadas a fin de evitar problemas posteriores.

El costo de estudios con el alcance mencionado, sumado al costo de la construcción de las soluciones adoptadas, sin olvidar los costos de mantenimiento puede compararse con el costo involucrado en un cambio de trazo

de tal modo que se eluda completamente la zona de deslizamientos sin olvidar los costos de diseño, construcción y conservación de la nueva infraestructura, solo de esta manera puede tomarse una decisión racional para resolver el problema. Debe notarse que no se menciona el valor escénico del trazo actual dado que es muy difícil cuantificarlo pero puede llegar a ser un factor de peso en la decisión final.

T A B L A V

| km | Sección | $\phi_{r\text{ sop}}$ | $\phi_{r\text{ lab}}$ | ϕ_r | F.S.I. | N.F.S. |
|----------|---------|-----------------------|-----------------------|----------|--------|--------|
| 12 + 360 | A | 11.60° | 10.00° | 14.74° | 1.00 | 1.00 |
| | C | 13.30° | 12.24° | 23.86° | 1.17 | 1.00 |
| | E | --- | --- | 8.59° | 1.50 | 1.11 |
| 15 + 500 | 2 | --- | --- | 26.57° | 1.06 | 0.997 |
| | 4 | 7.10° | 6.50° | 8.57° | 1.06 | 1.20 |
| | 6 | 13.20° | 8.00° | 16.50° | -- | 1.00 |
| 16 + 800 | 1 | 14.28° | --- | 6.58° | 1.26 | 1.00 |
| | | | | 17.98° | | 0.992 |
| 20 + 415 | 1 | 19.79° | --- | 22.00° | 1.00 | 1.00 |

N.F.S. = Nuevo Factor de Seguridad.

F.S.I. = Factor de Seguridad Inicial.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

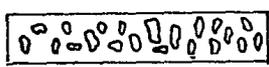
- Karl Terzaghi. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice".
Second Edition. Wiley International Edition. Chapter 5. pp 247-254.
- Juárez Badillo, Rico Rodríguez. "Mecánica de Suelos". Tomo I.
Segunda Edición. Editorial Limusa. Capítulo .
- Juárez Badillo, Rico Rodríguez. "Mecánica de Suelos". Tomo II.
Segunda Edición. Editorial Limusa. Capítulo .
- Juárez Badillo, Rico Rodríguez. "Mecánica de Suelos". Tomo III.
Segunda Edición. Editorial Limusa. Capítulo .
- Alfonso Rico, Hermilo del Castillo. "La ingeniería de suelos en
las vías terrestres". Volúmen 1. Primera Edición. Editorial Limusa.
Capítulo 6.
- Alfonso Rico, Hermilo del Castillo. "La ingeniería de suelos en
las vías terrestres". Volúmen 2. Primera Edición. Editorial Limusa.
Capítulo 13.
- Rico R.A., G.Springall., J.Springall C. "Deslizamientos en la Auto-
pista Tijuana-Ensenada". Contribución de la Secretaría de Obras Pú-
blicas al VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Inge-
niería de Cimentaciones. México, D.F.. 1969.

- Rico R.A., G. Springall., J. Springall C., G. Moreno P., J.A. Mendoza M.. "Deslizamientos en la Autopista Tijuana-Ensenada". Secretaría de Obras Públicas. México, D.F.. 1975.
- J. Springall C.. "Sucesión de Deslizamientos en el Km.12 de la Autopista Tijuana-Ensenada".XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Volúmen 1. México, Mazatlán. 1986.
- Figueroa J.. "Sismicidad en Baja California". Instituto de Ingeniería.U.N.A.M. 1973.
- Lomnitz C.. " Sismicidad y Tectónica de la Región Norte del Golfo de Baja California, México-Resultados Preliminares".Geofísica Internacional. Volúmen 10. No.2. 1970.
- Allen C., Silver L., " Agua Blanca Fault a Major Transverse Estructure of Northern Baja California, México". Bull. of the Geological Soc. of America. Volúmen 71 : pp 457-482, 1960.
- Rico R.A., Moreno P.G., García A.G.. "Stabilization of some sliding Masses on Tijuana-Ensenada Highway", Permanent International Association of road Congresses. XIV World Congress.Question 1. Prague. 1971.

LUTITA



CONGLOMERALO



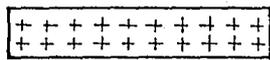
TERRAPLEN



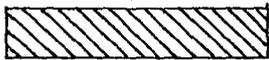
ARENISCA



DEPOSITO DE TALUD



LUTITA ALTERADA



SIMBOLOGIA PARA REPRESENTAR LOS DISTINTOS MATERIALES

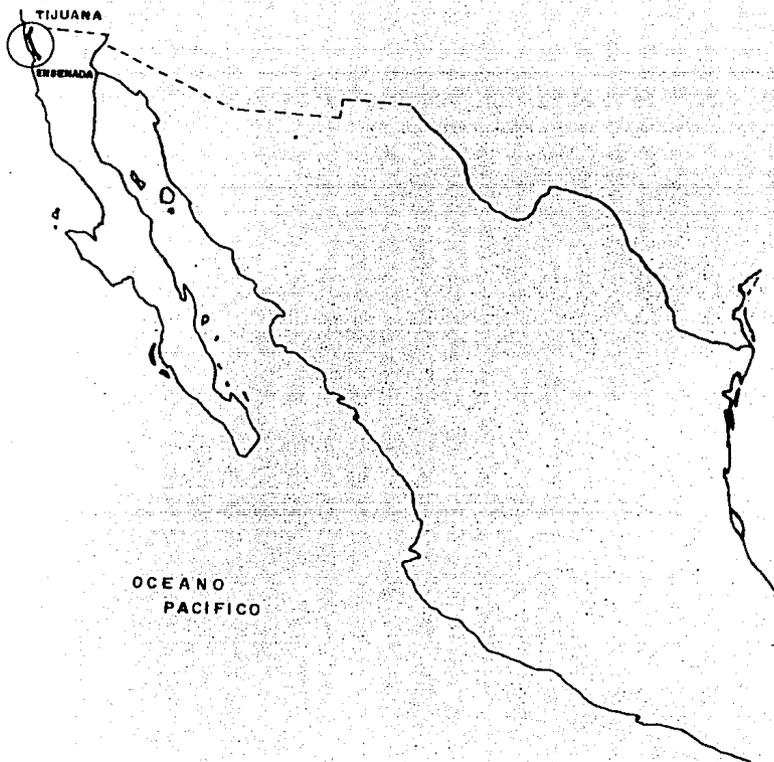


FIGURA 1 MAPA PARCIAL DE MEXICO MOSTRANDO LA AUTOPISTA TIJUANA-ENSENADA.

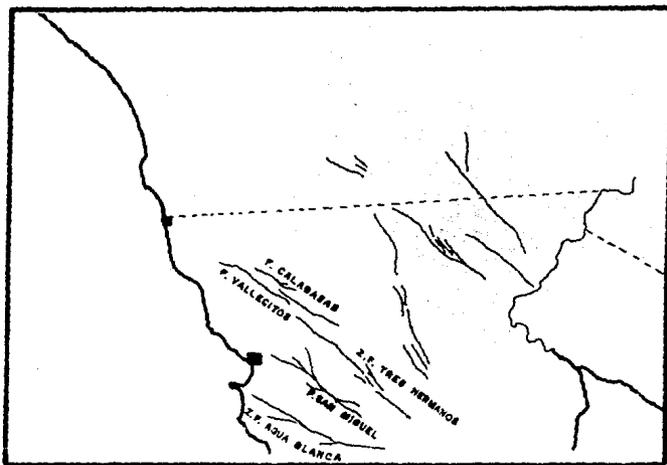


FIGURA 2 PRINCIPALES SISTEMAS DE FALLAS EXISTENTES EN LA ZONA DE LA AUTOPISTA TIJUANA-ENSENADA.

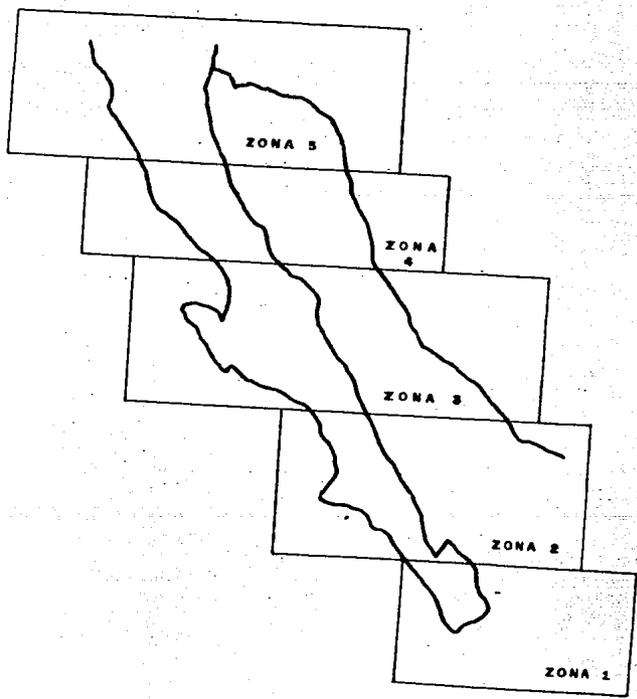
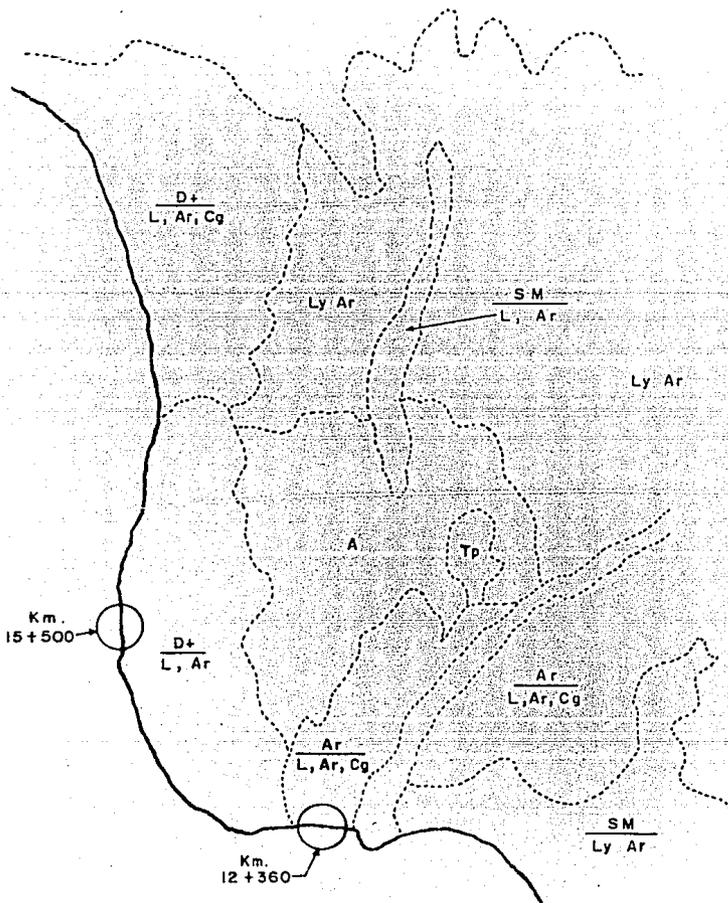


FIGURA 3

ZONIFICACION SÍSMICA DE LA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA .



A ANDESITA

D+ DEPOSITOS DE TALUD

SM ARENA LIMOSA

Cg CONGLOMERADO

Ly Ar LUTITAS INTERESTRATIFICADAS
CON ARENISCAS

Tp TOBA PUNITICA

FIGURA 4

GEOLOGIA SUPERFICIAL DE LA
ZONA DE DESLIZAMIENTOS .

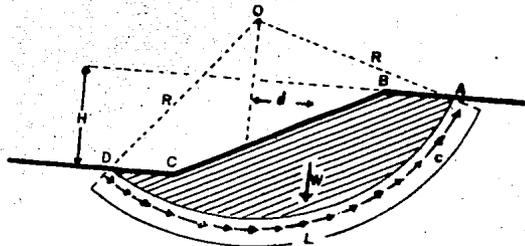


FIGURA 5 EL METODO SUECO APLICADO A UN TALUD PURAMENTE COHESIVO .

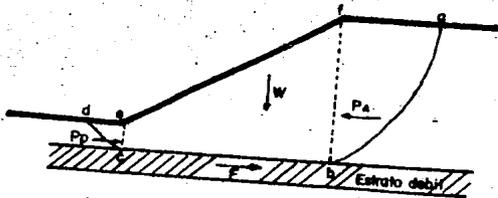


FIGURA 7 FALLA POR TRASLACION

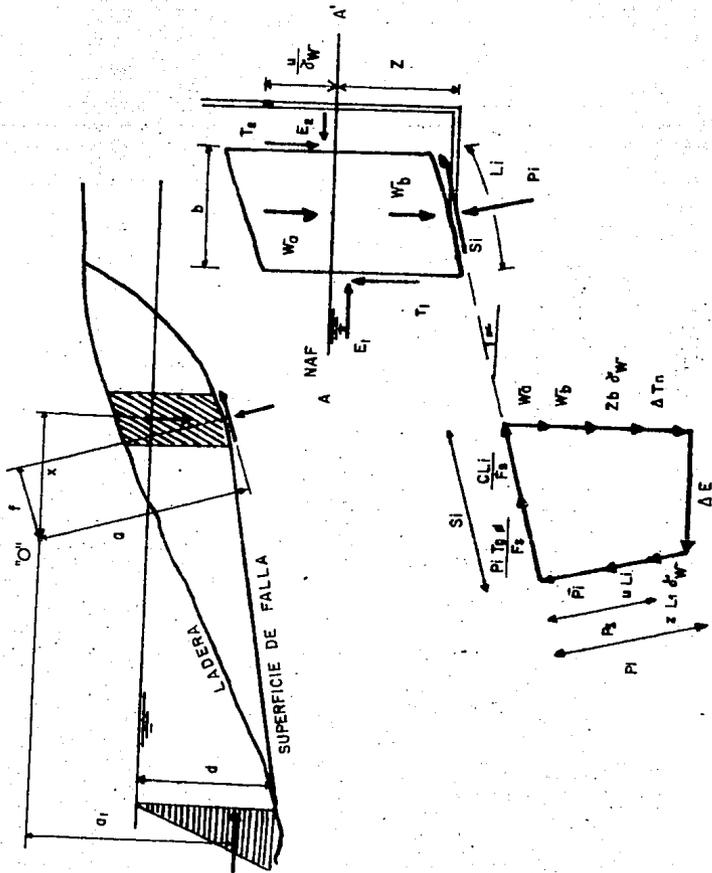


FIGURA 8

ANALISIS DE ESTABILIDAD EN SUPERFICIES DE FALLA COMPUESTAS.

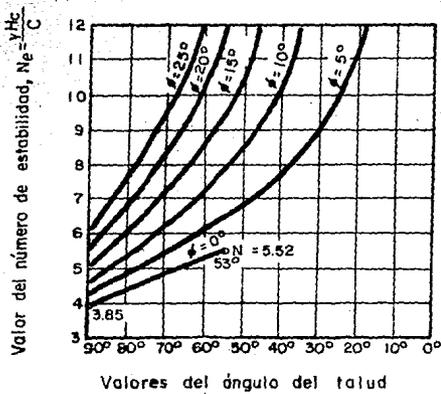


FIGURA 9 **GRAFICA DE TAYLOR PARA DETERMINAR EL**
NUMERO DE ESTABILIDAD DE UN TALUD

$\phi \neq 0$, $c \neq 0$

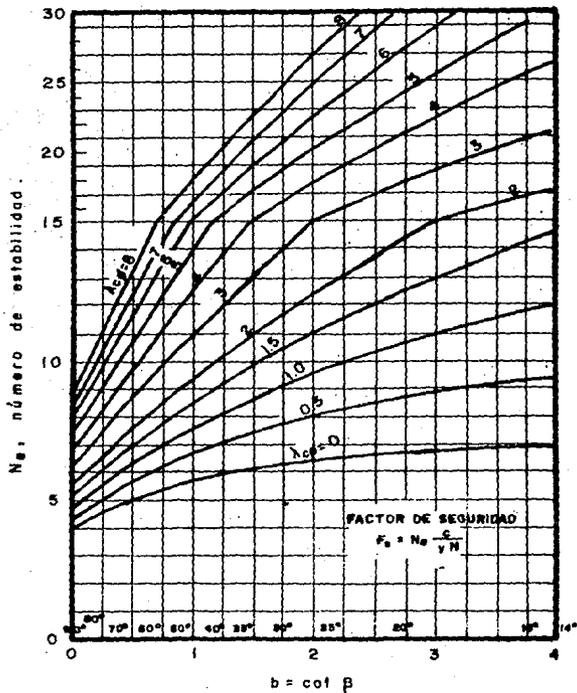


FIGURA 10 NUMEROS DE ESTABILIDAD ASOCIADOS A CIRCULOS CRITICOS POR EL PIE DEL TALUD, SEGUN N. JAMBU.

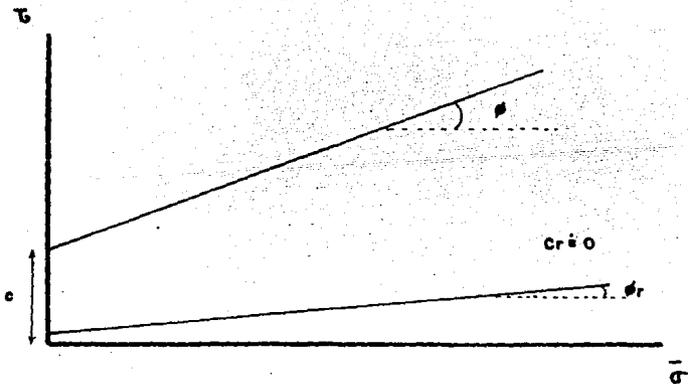
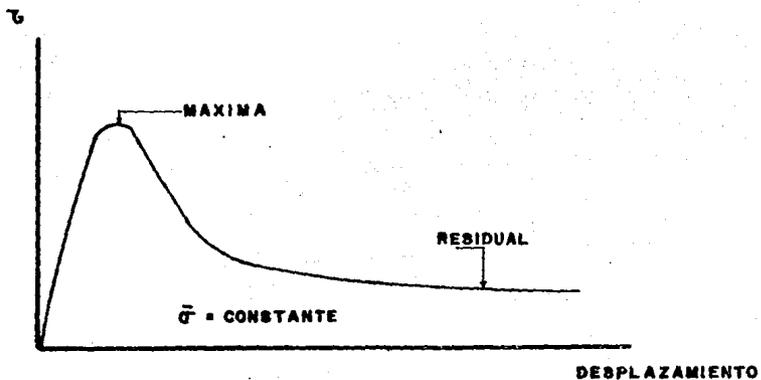


FIGURA II RESISTENCIA RESIDUAL DE LOS SUELOS.

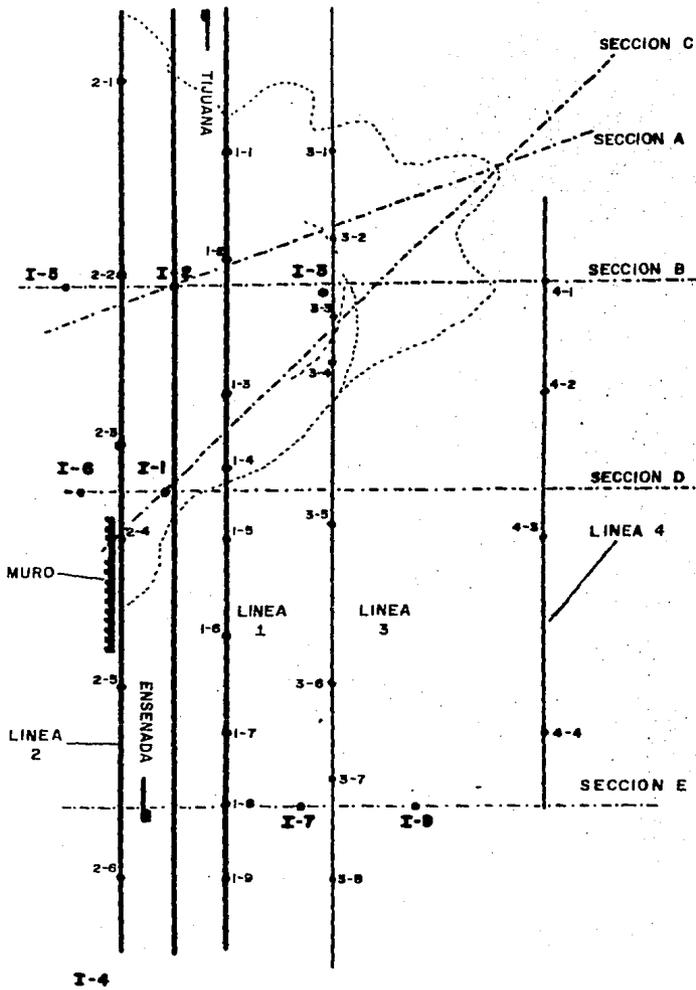


FIGURA 12 DESLIZAMIENTO EN EL KM. 12 + 360 .

FIGURA 13 ESTRATIGRAFIA EN LA SECCION A DEL KM. 12+360

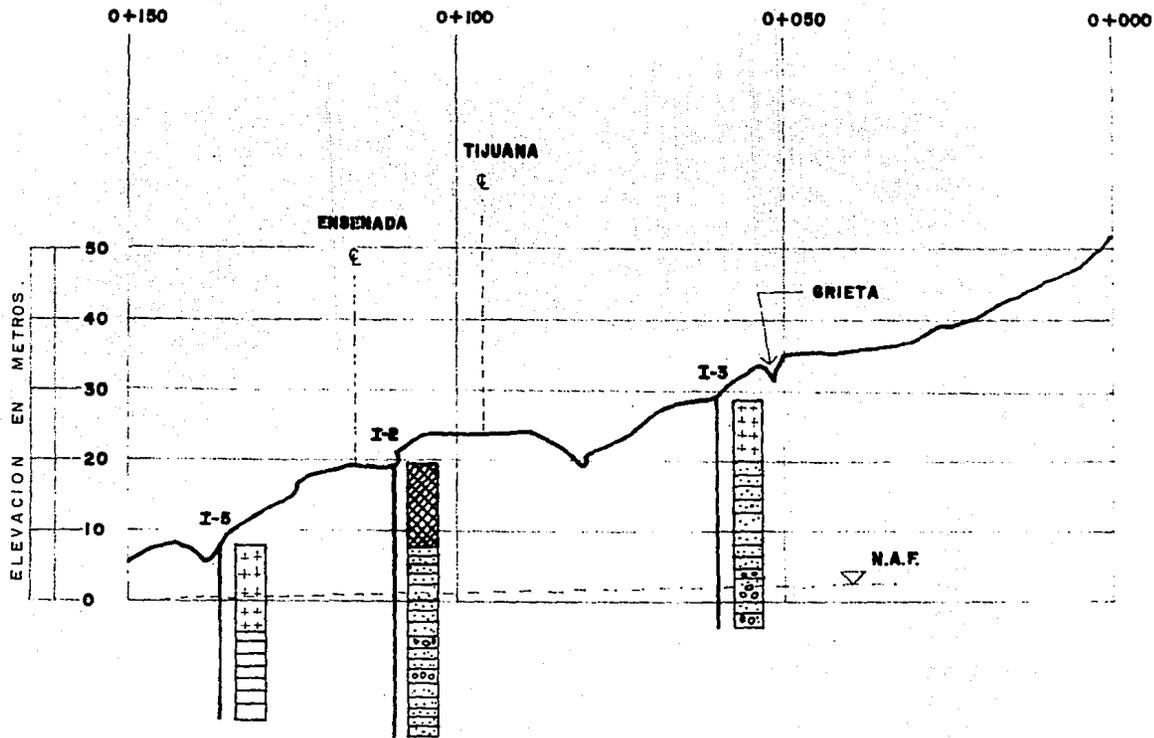


FIGURA 14 ESTRATIGRAFIA DE LA SECCION C EN EL
KM. 12 + 360

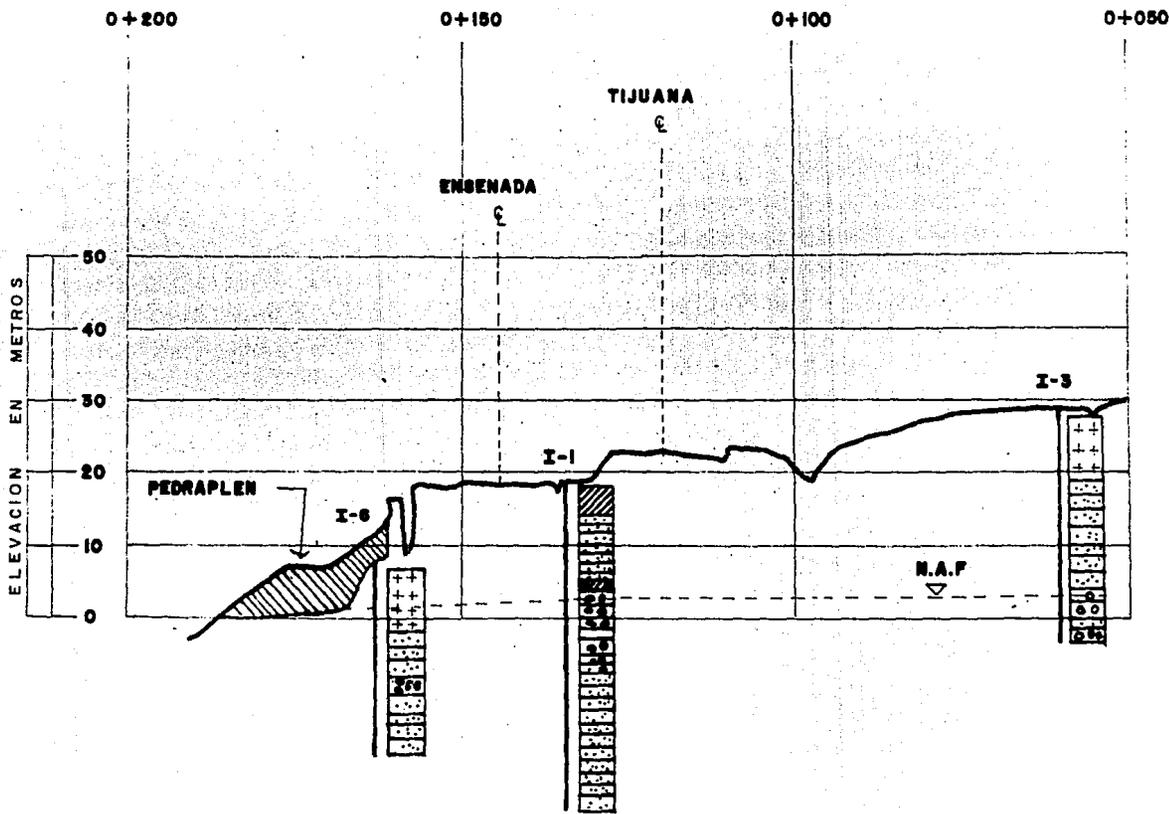


FIGURA 15 ESTRATIGRAFIA DE LA SECCION E EN EL KM. 12+360.

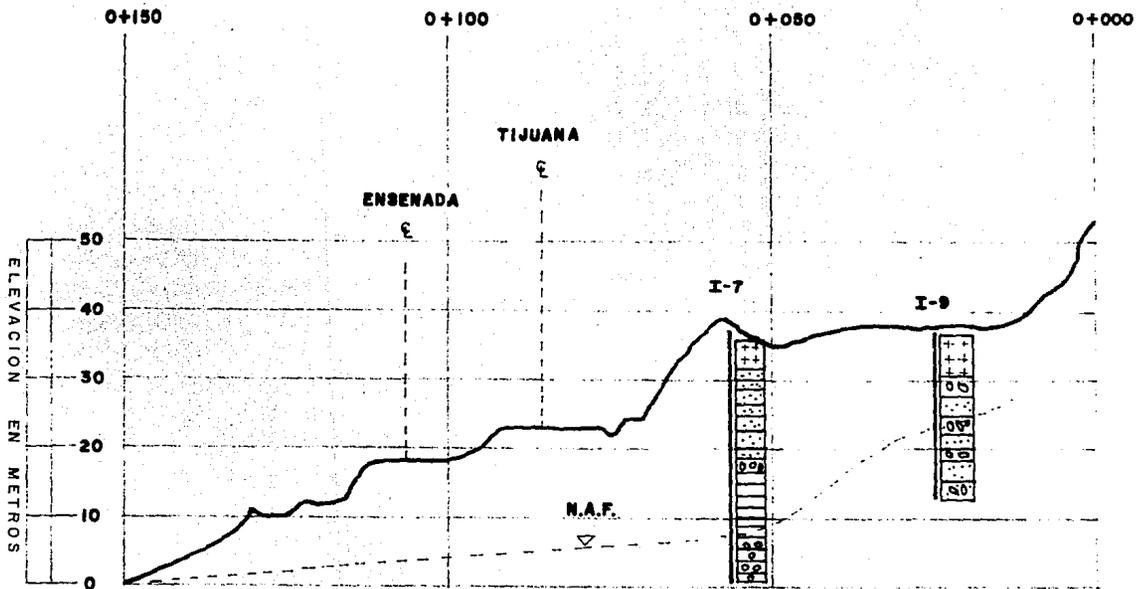


FIGURA 16 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO DE LA SECCION A EN EL KM. 12+360

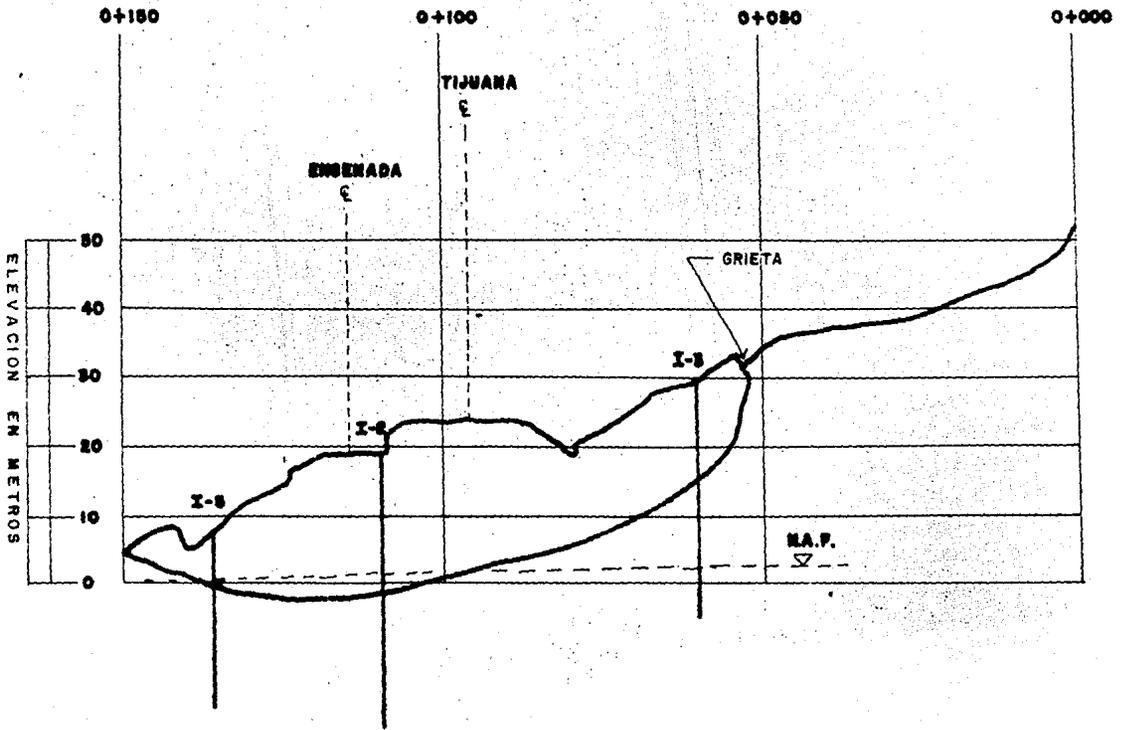


FIGURA 17 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO DE LA SECCION C
EN EL K.M. 12+360.

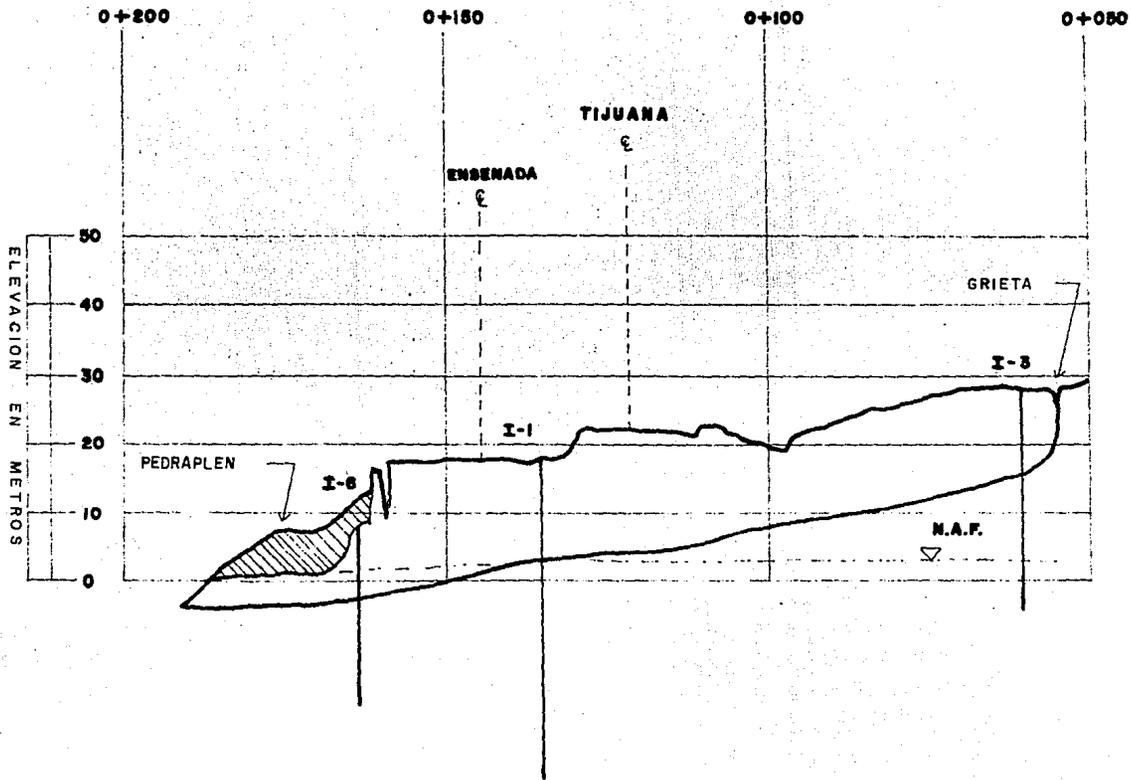


FIGURA 18 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO DE LA SECCION E EN EL KM. 12+360

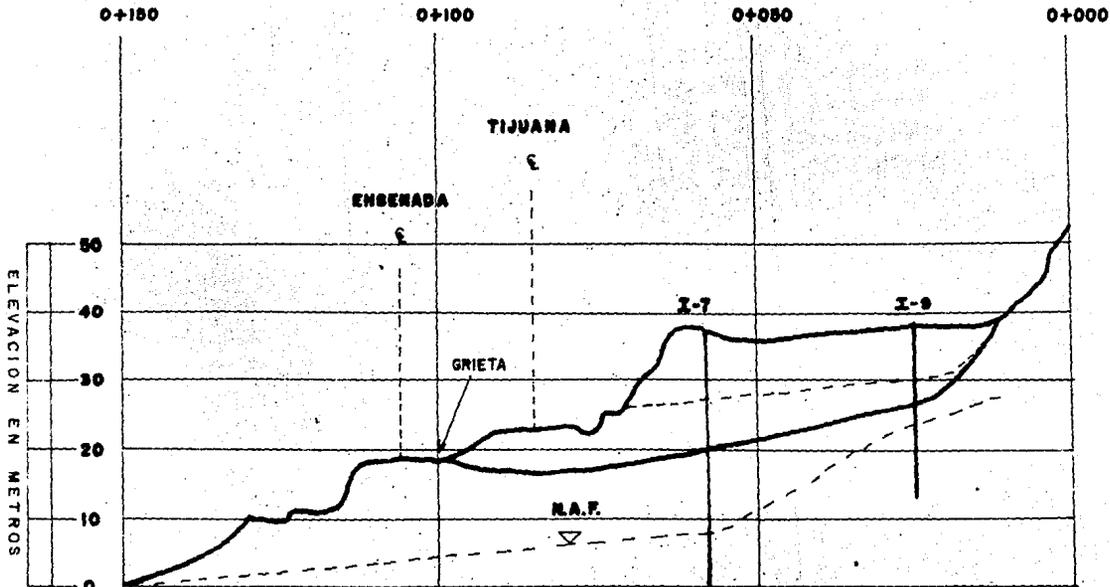


FIGURA 19 MOVIMIENTOS CONSPICUOS EN LA LINEA 1.

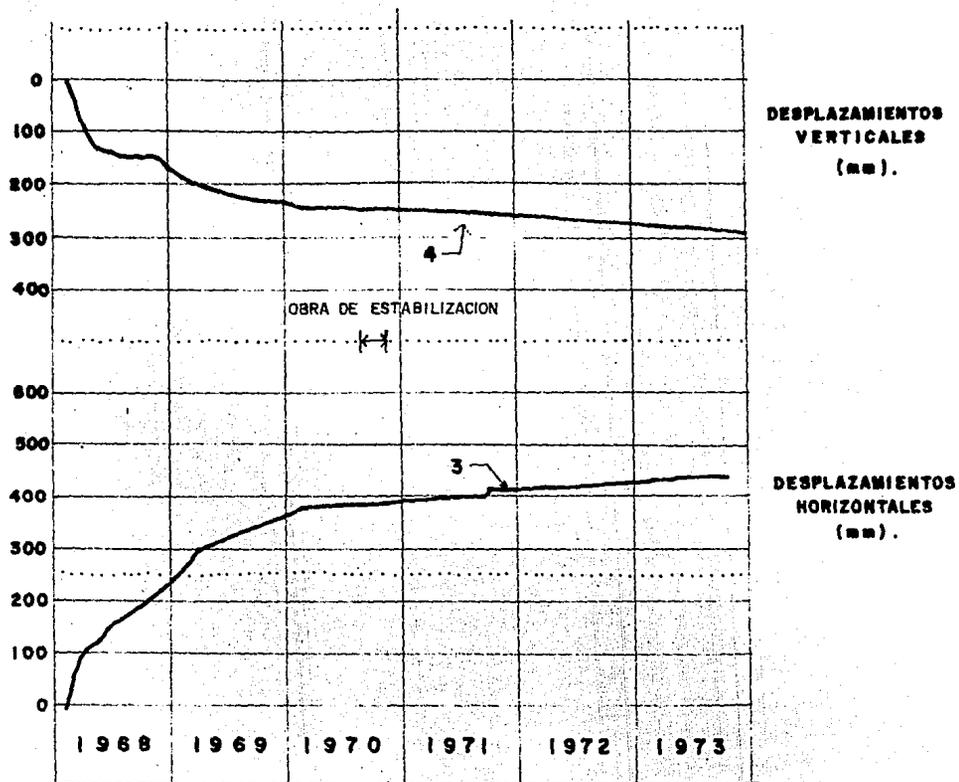


FIGURA 20 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA 2

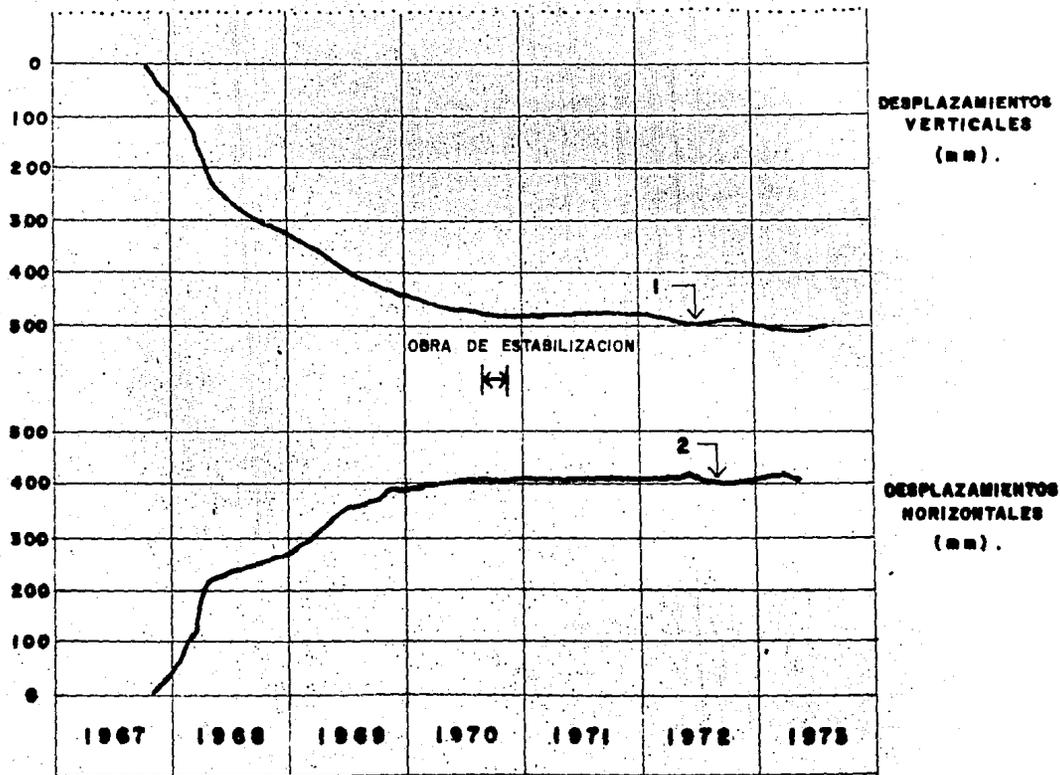


FIGURA 21 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA M

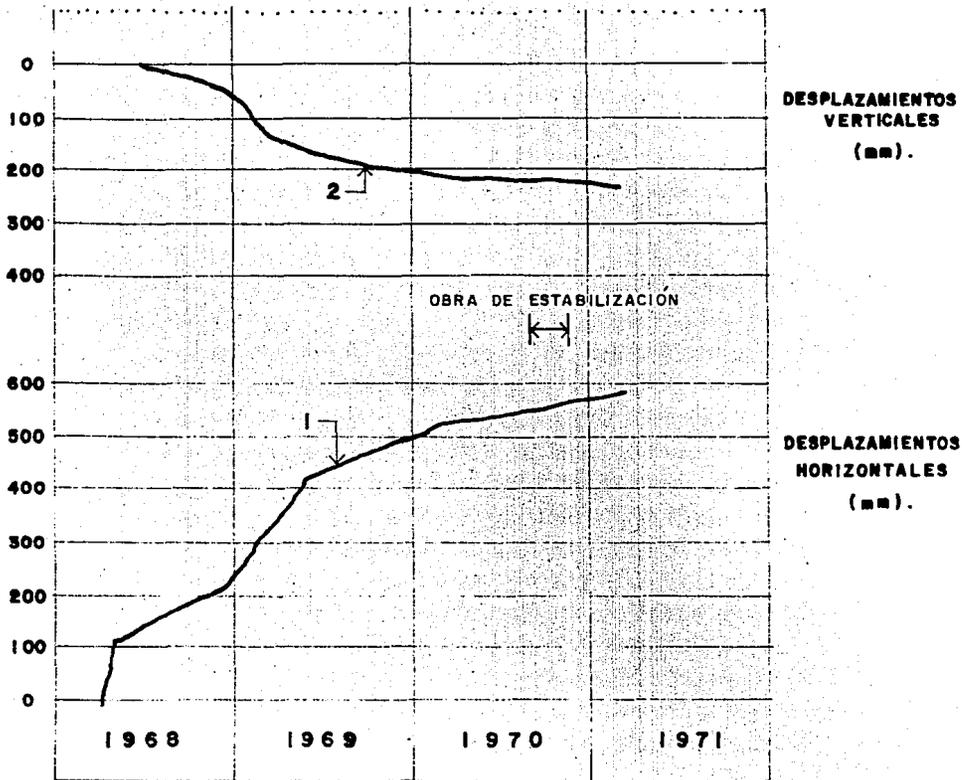


FIGURA 23 GRAFICA ESFUERZO - DEFORMACION PARA LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO EN EL KM. 12 + 360

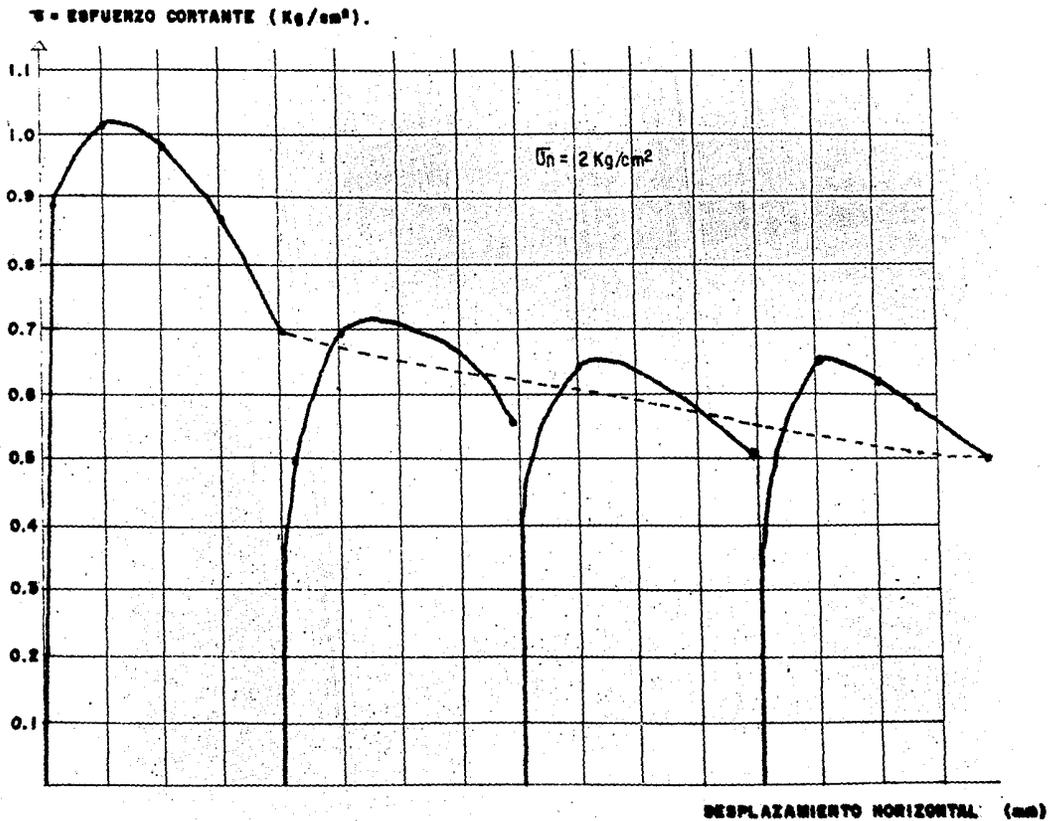


FIGURA 24 PRUEBA DE CORTE DIRECTO POR TORSION EN EL
K.M. 12 + 360 .

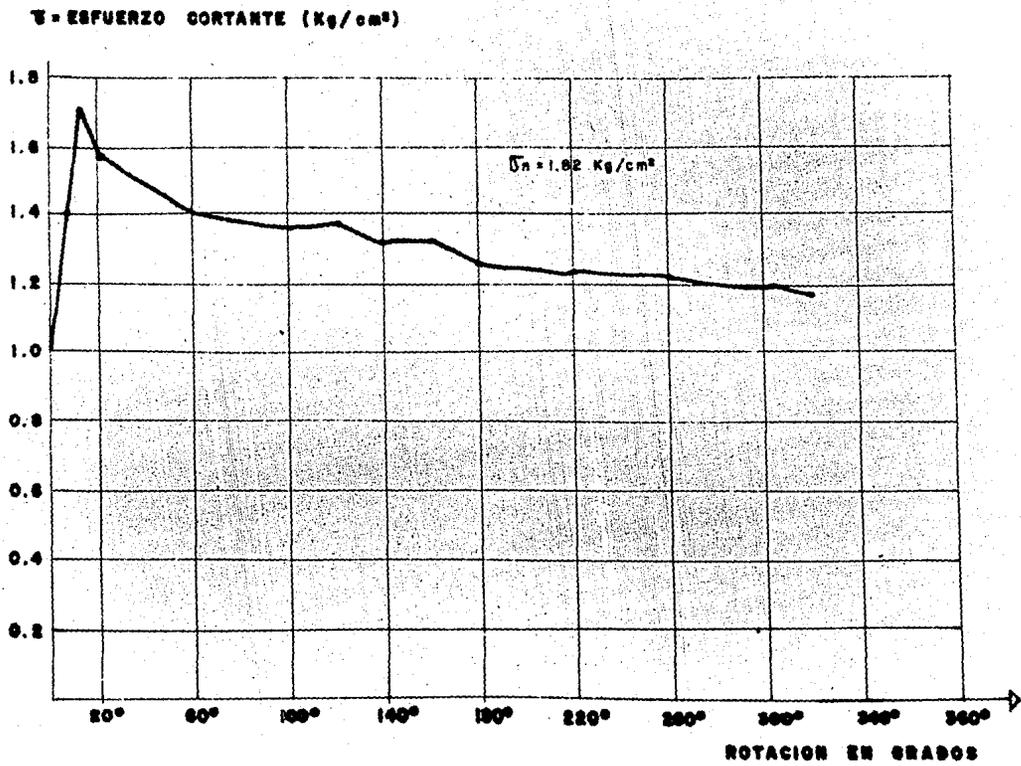
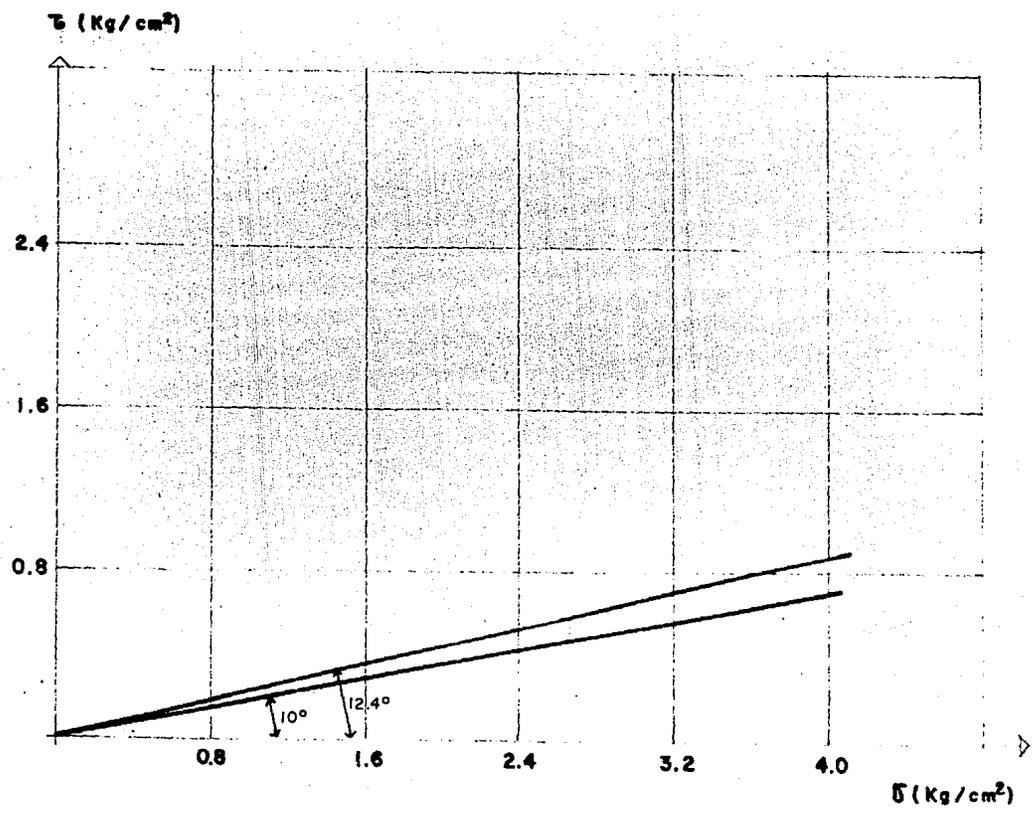


FIGURA 25 ENVOLVENTE DE MOHR PARA EL KM. 12+360



INICIO

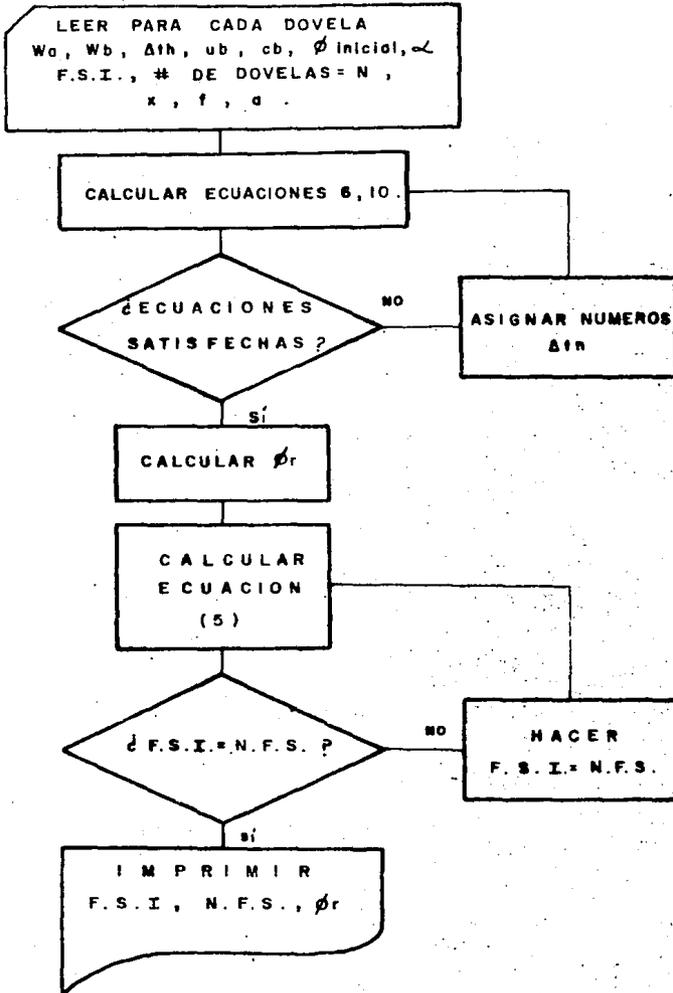


FIGURA 26

DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR EL FACTOR DE SEGURIDAD EN UNA SUPERFICIE DE FALLA COMPUESTA CON EL METODO DE TERZAGHI.

JLIST

```

10 HOME
20 REM ***** TALUD *****
30 REM
40 REM PROGRAMA PARA CALCULAR EL FACTOR DE SEGURIDAD
50 REM EN UNA SUPERFICIE DE FALLA COMPUESTA
60 REM CONSIDERANDO INTERACCION ENTRE DOVELAS
70 REM
80 REM DEFINICION DE VARIABLES:
90 REM
100 REM F1= ANGULO DE FRICCION INTERNA EN RADIANES
110 REM F2= FACTOR DE SEGURIDA
120 REM N= NUMERO DE DOVELAS
130 REM M= NUMERO DE VARIABLES POR DOVELA
140 REM ALFA= ANGULO DE INCLINACION DE LA SUP. DE FALLA EN CADA
DOVELA
150 REM ESFC= FUERZA RESULTANTE DE CORTE EN CADA DOVELA EN TONE-
LADAS
160 REM
170 REM LA MATRIZ DE DATOS DEBE POSEER LA SIGUIENTE FORMA:
180 REM
190 REM Wa,Wb,Ub,Cb,ALFA,ESFC,xf,a
200 REM
210 REM
220 CLEAR
230 LET D = 0
240 LET DL = 0
250 LET M = 9
260 READ N,F2,F1
270 DIM Z (N,M)
280 DIM T (N),H(N),U(N),G(N),Q(N),R(N),X(N)
290 FOR J = 1 TO N
300 FOR L = 1 TO M
310 READ Z(J,L)
320 NEXT L
330 NEXT J
340 REM
350 REM
360 REM LA COMPUTADORA SOLICITA EL VALOR RESULTANTE
370 REM DE LA FUERZA CORTANTE POR DOVELA
380 REM
390 REM
400 FOR J = 1 TO N
410 PRINT " VALOR DE CORTANTE POR FAVOR....";
420 INPUT T (J)
430 LET W = Z(J,1) + Z(J,2) + T(J)
440 LET W1 = W - Z(J,3)
450 LET W2 = W1 * TAN (F1)
460 LET W3 = Z(J,4) + W2
470 LET W4 = W * TAN (Z(J,5))
480 LET C2 = COS (Z(J,5))
490 LET I1 = TAN (F1)
500 LET I2 = TAN (Z(J,5))
510 LET A1 = I2 * I1

```

```

520 LET A2 = A1 / F2
530 LET A3 = A2 + 1
540 LET A4 = A3 * C2
550 LET B1 = W3 / A4
560 LET B2 = B1 / F2
570 LET B3 = 1 / C2
580 LET B4 = (B1 / F2) * B3
590 LET H(J) = B4 - W4
600 LET D = D + H(J)
610 LET D1 = D1 + T(J)
620 NEXT J
630 HOME
640 PRINT
650 PRINT " LA ECUACION 6 VALE = ";D1
660 PRINT
670 PRINT " LA ECUACION 10 VALE = ";D
680 PRINT
690 REM
700 REM
710 REM LA COMPUTADORA SOLICITA VARIABLE DE DECISION D5,
720 REM SI LAS ECUACIONES 10 Y 6 SON APROXIMADAMENTE
730 REM IGUALES A CERO, SE DEBE INTRODUCIR 100,
740 REM EN CASO CONTRARIO CUALQUIER OTRO NUMERO
750 REM
760 REM
770 PRINT
780 PRINT
790 PRINT
800 PRINT " SI SE HA OBTENIDO EL GRADO DE APROXIMACION REQUERIDO"
810 PRINT
820 PRINT " INTRODUCIR 100, EN CASO CONTRARIO"
830 PRINT
840 PRINT " CUALQUIER NUMERO DIFERENTE...";
850 INPUT D5
860 IF D5 = 100 THEN 900
870 RESTORE
880 GOTO 220
900 FOR J = 1 TO N
910 LET Z(J,6) = T(J)
920 NEXT J
930 LET E2 = 0
940 LET E7 = 0
950 LET E9 = 0
970 HOME
980 REM
990 REM LA COMPUTADORA SOLICITA EL ANGULO
1000 REM DE FRICCIÓN INTERNA EN RADIANTES
1010 REM
1020 REM
1030 PRINT " INTRODUCIR EL ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA"
1040 PRINT " EN RADIANTES POR FAVOR";
1050 INPUT F1
1060 FOR J = 1 TO N
1070 LET U(J) = (Z(J,1) + Z(J,2)) * Z(J,7)
1080 LET E2 = E2 + U(J)
1090 LET W = Z(J,1) + Z(J,2) + Z(J,6)
1100 LET E3 = ( TAN (F1) * Z(J,3)) - Z(J,4)

```

```

1110 LET E4 = ( TAN (Z(J,5)(( / F2
1120 LET E5 = E4 * E3
1130 LET E6 = W + E5
1140 LET C2 = COS (Z(J,5))
1150 LET I1 = TAN (F1)
1160 LET I2 = TAN (Z(J,5))
1170 LET A1 = I1 * I2
1180 LET A2 = A1 / F2
1190 LET A3 = A2 + 1
1200 LET A4 = A3 * C2
1210 LET G(J) = (Z(J,8) / A4) * E6
1220 LET E7 = E7 + G(J)
1230 LET L1 = (W - Z(J,3)) * I1
1240 LET L2 = Z(J,4) + L1
1250 LET O(J) = L2 * (Z(J,9) / A4)
1260 LET E9 = E9 + O(J)
1270 NEXT J
1280 LET D2 = E2 - E7 - E9
1290 PRINT
1300 PRINT
1310 PRINT
1320 PRINT " VALOR DE LA SUMA D2 = ";D2
1330 REM
1340 REM
1350 REM LA COMPUTADORA SOLICITA VARIABLE DE DICISSION D3
1360 REM SI LA SUMA D2=0 APROXIMADAMENTE
1370 REM SIGNIFICA QUE EL ANGULO DE FRICCION INTERNA
1380 REM PROPUESTO ES CORRECTO Y DEBE INTRODUCIRSE
1390 REM     D3=100
1400 REM
1410 REM
1420 PRINT
1430 PRINT
1440 PRINT
1450 PRINT " SI LA SUMA D2=0 APROXIMADAMENTE
1460 PRINT
1470 PRINT " ENTONCES INTRODUCIR 100, EN CASO CONTRARIO"
1480 PRINT
1490 PRINT " CUALQUIER NUMERO DIFERENTE"
1500 PRINT
1510 PRINT
1520 INPUT D3
1530 IF D3 = 100 THEN 1550
1540 GOTO 930
1550 HOME
1560 PRINT
1570 PRINT
1580 PRINT
1590 PRINT " VALOR DE EL ANGULO DE FRICCION INTERNA EN RADIANTES =
1600 PRINT
1610 PRINT
1620 PRINT
1630 REM
1640 REM
1650 REM LA COMPUTADORA SOLICITA
1660 REM EL FACTOR DE SEGURIDAD

```

```

1670 REM
1680 REM
1690 LET I5 = 0
1700 LET A9 = 0
1710 LET W5 = 0
1730 PRINT
1740 PRINT
1750 PRINT
1760 PRINT
1770 PRINT " VALOR DE EL FACTOR DE SEGURIDAD POR FAVOR";
1780 INPUT F2
1790 FOR J = TO N
1800 LET I1 = TAN (F1)
1810 LET I2 = TAN (Z(J,5))
1820 LET W = Z(J,1) + Z(J,2) + Z(J,6)
1830 LET W1 = W - Z(J,3)
1840 LET W2 = W1 * I1
1850 LET W3 = W2 + Z(J,4)
1860 LET I3 = W3 * Z(J,9)
1870 LET I4 = Z(J,1) + Z(J,2)
1880 LET Q(J) = I4 * Z(J,7)
1890 LET I5 = I5 + Q(J)
1900 LET I6 = I1 * Z(J,3)
1910 LET I7 = I6 - Z(J,4)
1920 LET I8 = I7 * I2
1930 LET A5 = I8 / F2
1940 LET A6 = A5 + W
1950 LET A7 = A6 * Z(J,8)
1960 LET A1 = I1 * I2
1970 LET A2 = A1 / F2
1980 LET A3 = A2 + 1
1990 LET A4 = A3 * ( COS (Z(J,5)))
2000 LET R(J) = I3 / A4
2010 LET A9 = A9 + R(J)
2020 LET X(J) = A7 / A4
2030 LET W5 = W5 + X(J)
2040 NEXT J
2050 LET W6 = A9 / (I5 - W5)
2060 LET W7 = W6 - F2
2070 REM
2080 REM
2090 REM LA COMPUTADORA IMPRIMIRA EL FACTOR DE SEGURIDAD INICIAL
2100 REM EL NUEVO FACTOR DE SEGURIDAD Y LA DIFERENCIA
2110 REM ENTRE AMBOS
2120 REM
2130 REM
2140 HOME
2150 PRINT
2160 PRINT
2170 PRINT
2180 PRINT "-----"
2190 PRINT
2200 PRINT
2210 PRINT " F.S. INICIAL =" ; F2
2220 PRINT
2230 PRINT

```

```
2240 PRINT "NUEVO F.S. = ";W6
2250 PRINT
2260 PRINT
2270 PRINT " (F.S.I.)-(N.F.S.) = ";W7
2280 PRINT
2290 PRINT
2300 PRINT "-----"
2310 PRINT
2320 PRINT
2330 PRINT
2340 PRINT " SI N.F.S. ES MUY APROXIMADO
2350 PRINT " A F.S.I. ENTONCES INTRODUCIR 100,"
2360 PRINT " EN CASO CONTRARIO IGUALAR"
2370 PRINT " F.S.I.= N.F.S."
2380 PRINT " E INTRODUCIR CUALQUIER OTRO NUMERO"
2390 INPUT D4
2400 IF D4 = 100 THEN 2430
2410 HOME
2420 GOTO 1690
2430 HOME
2440 PRINT
2450 PRINT
2460 PRINT
2470 PRINT "*****"
2480 PRINT
2490 PRINT " FACTOR DE SEGURIDAD "
2500 PRINT
2510 PRINT " ";W6
2520 PRINT
2530 PRINT "*****"
2540 END
```

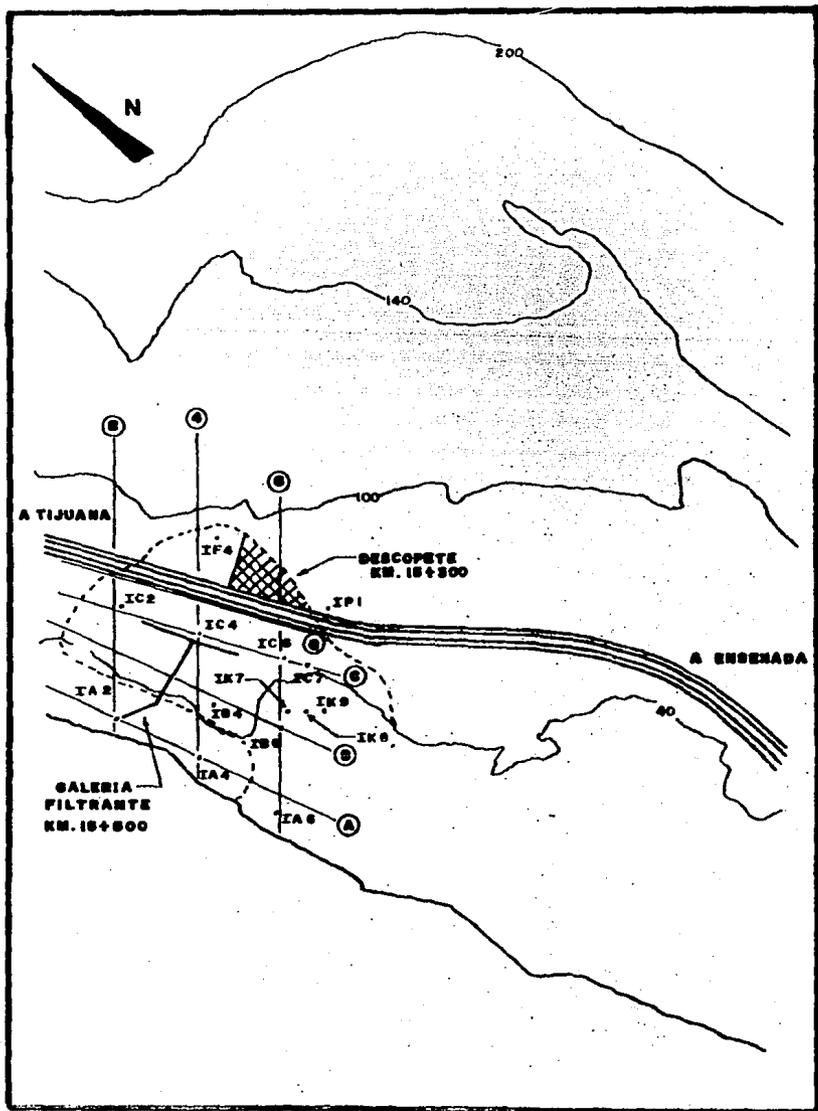


FIGURA 28 DESLIZAMIENTO EN EL KM. 15 + 500

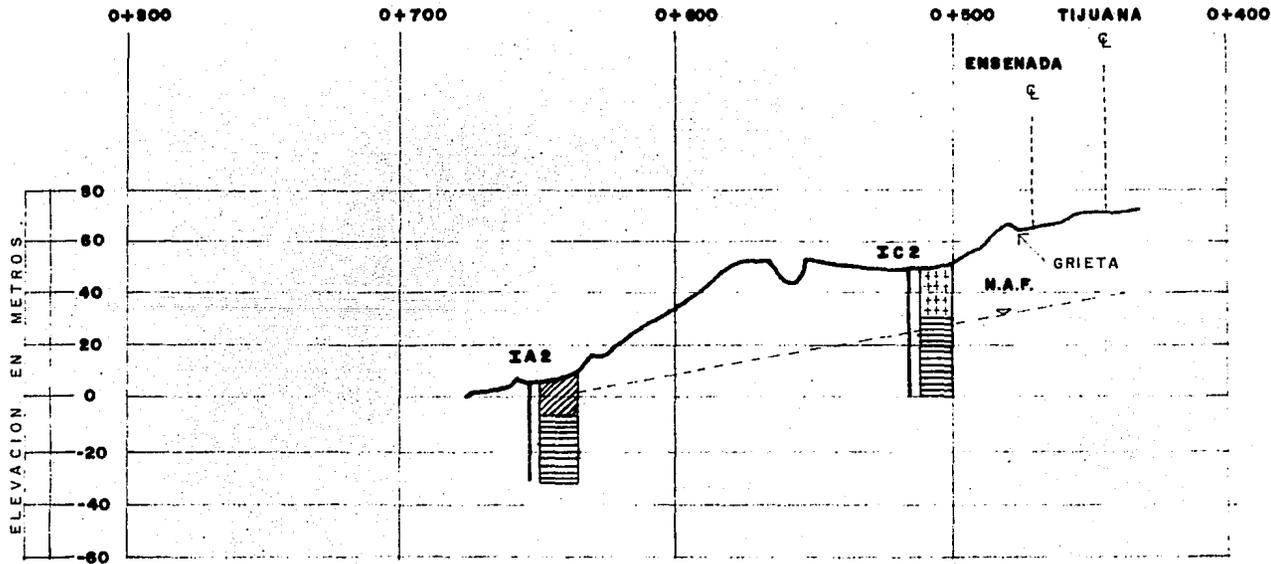


FIGURA 29 ESTRATIGRAFIA EN LA SECCION 2 DEL KM. 15+500

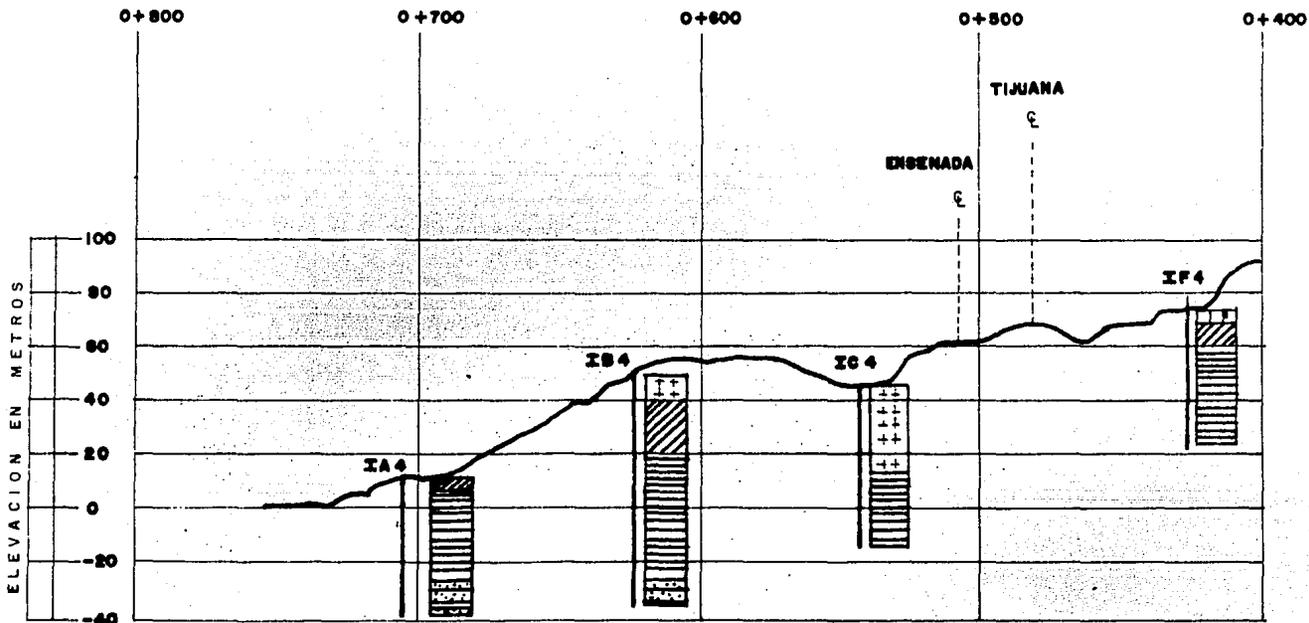


FIGURA 30 ESTRATIGRAFIA EN LA SECCION 4 DEL KM. 18+500

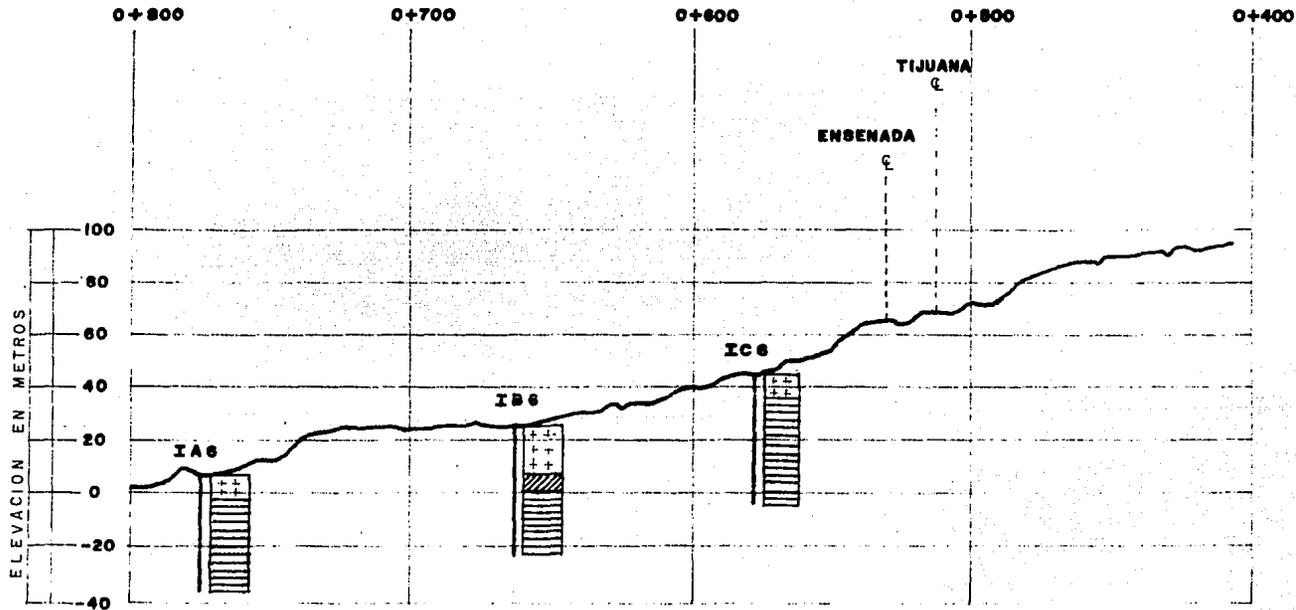


FIGURA 31 ESTRATIGRAFIA EN LA SECCION 6 DEL KM. 15+500

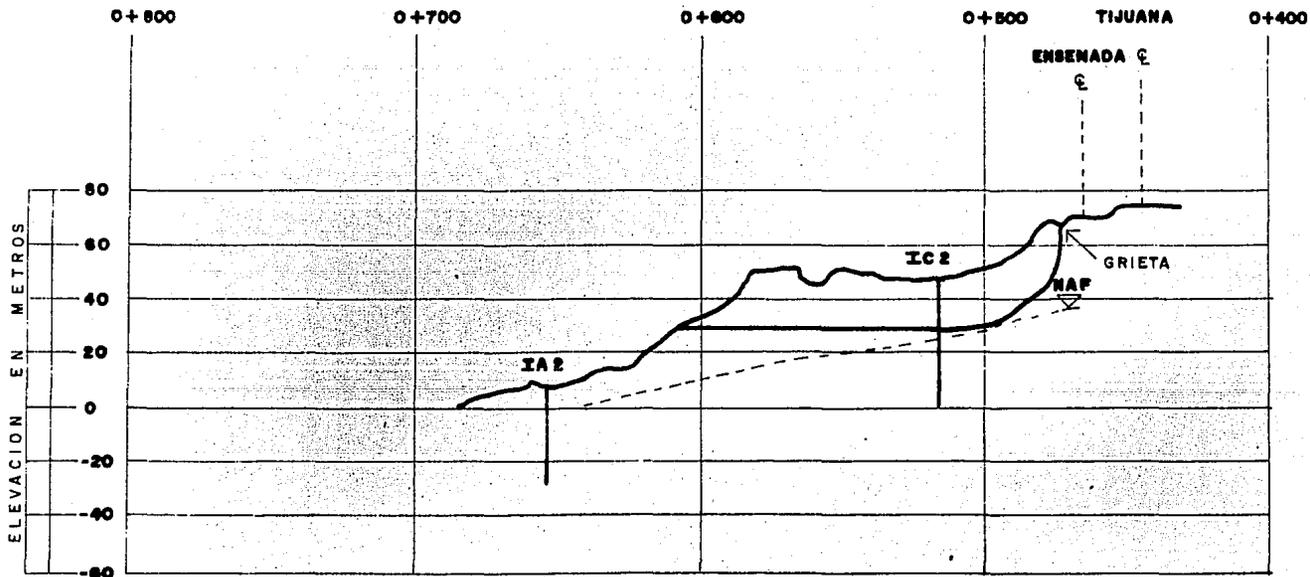


FIGURA 32 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO EN LA SECCION 2 DEL KM. 18+800

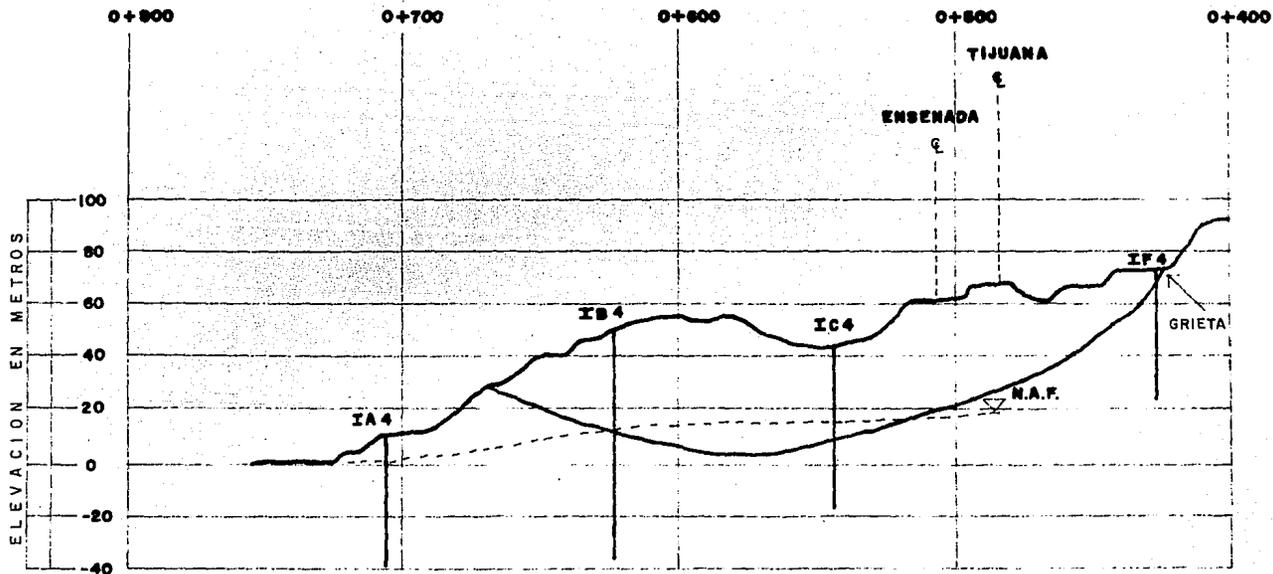


FIGURA 33 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO EN LA SECCION 4 DEL KM. 15+500

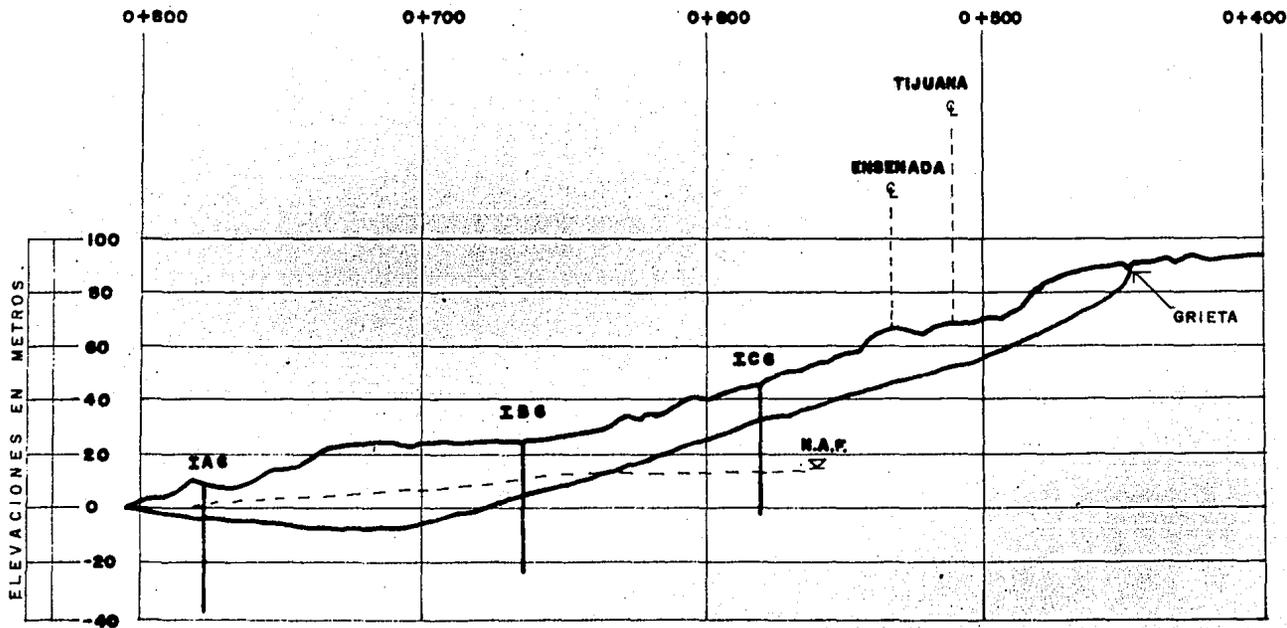


FIGURA 34 SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO EN LA SECCION 6 DEL KM. 16+800

FIGURA 35 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA A .

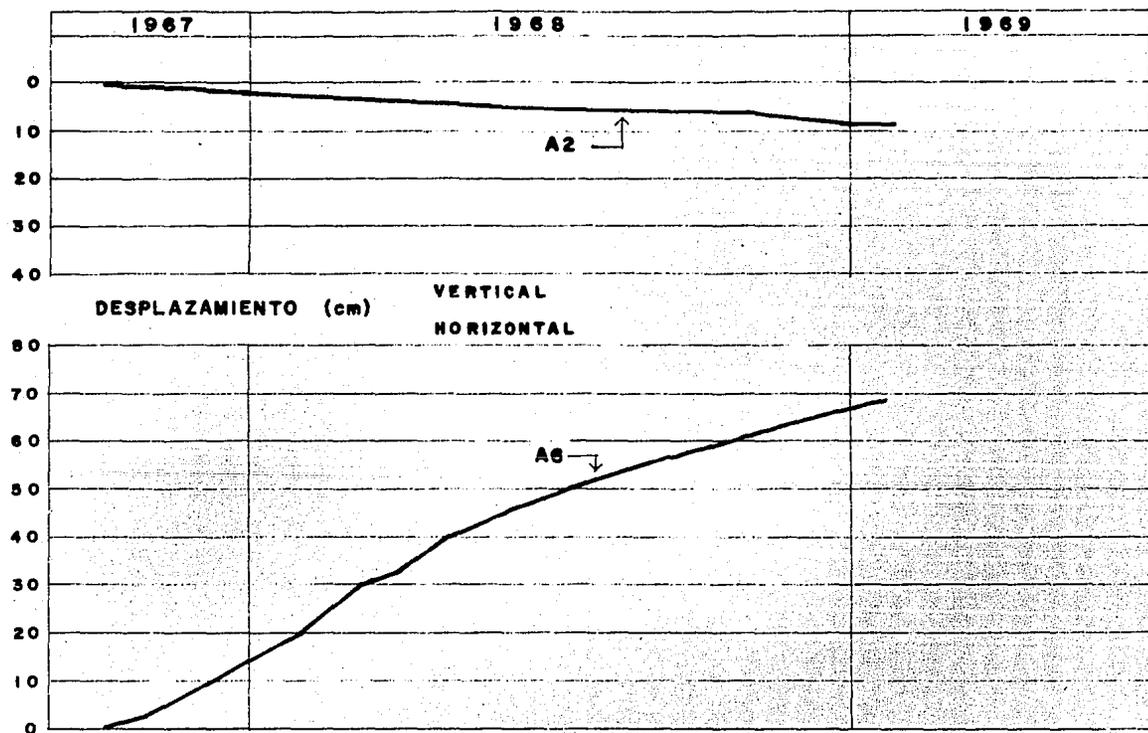


FIGURA 36 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA B

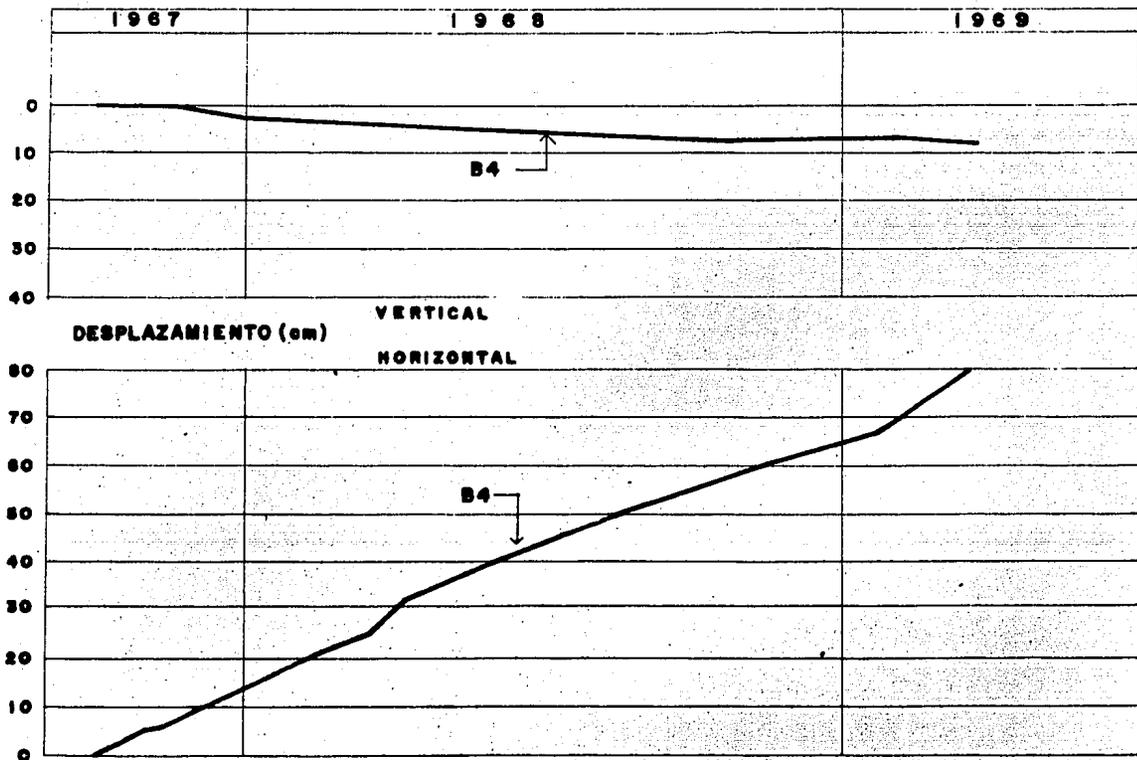


FIGURA 37 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA C .

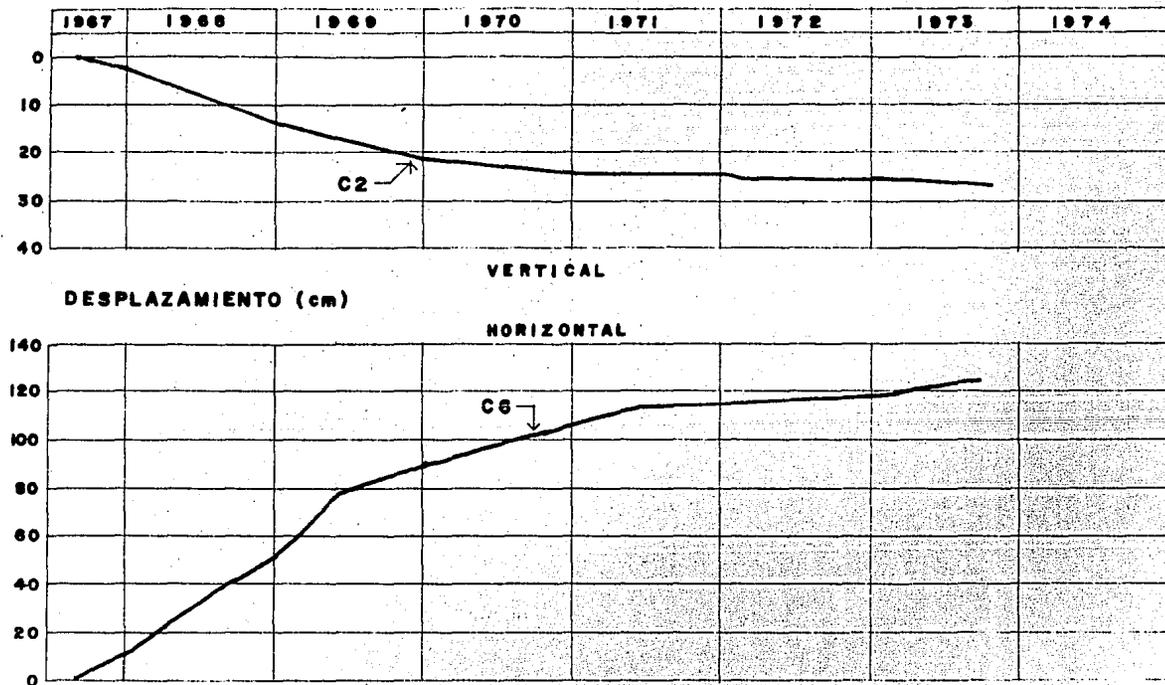


FIGURA 38 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA Q.

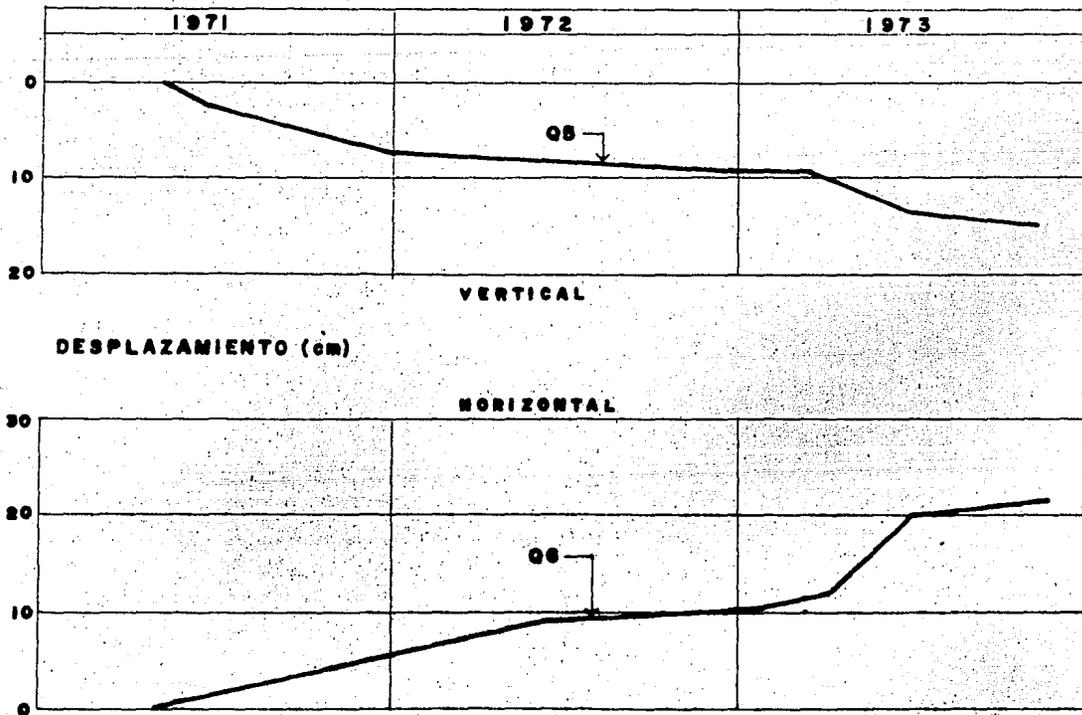


FIGURA 39 MOVIMIENTOS MAS CONSPICUOS EN LA LINEA H .

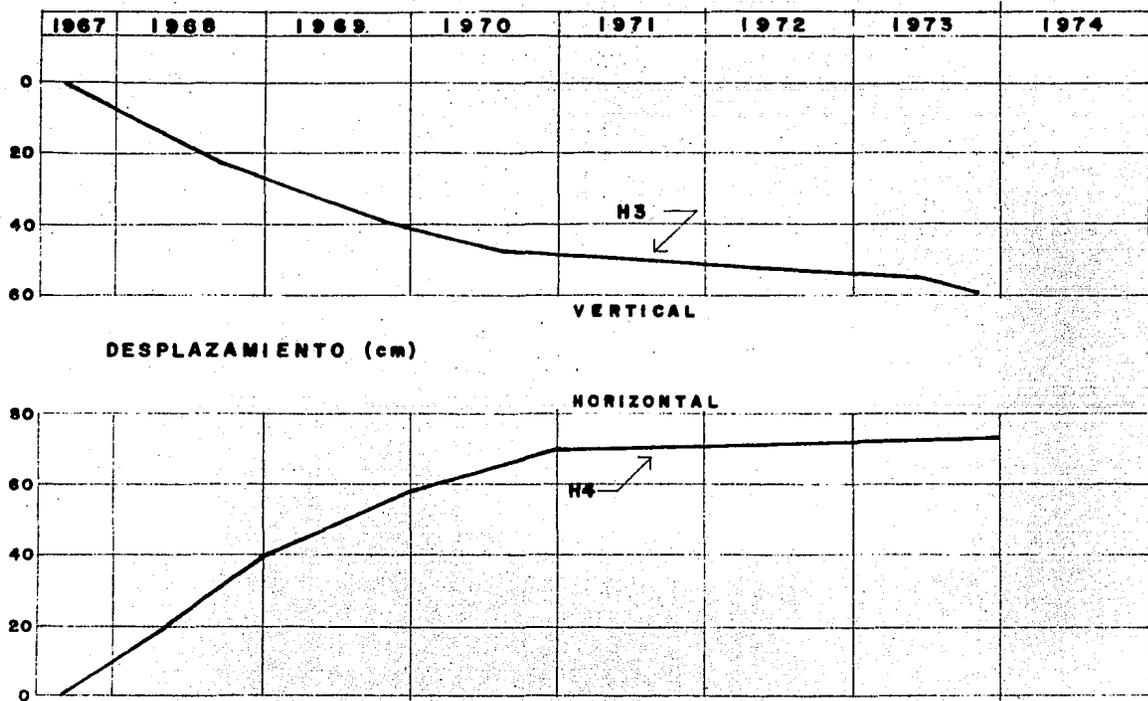


FIGURA 40 GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACION PARA LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO EN EL K.M. 15+500 .

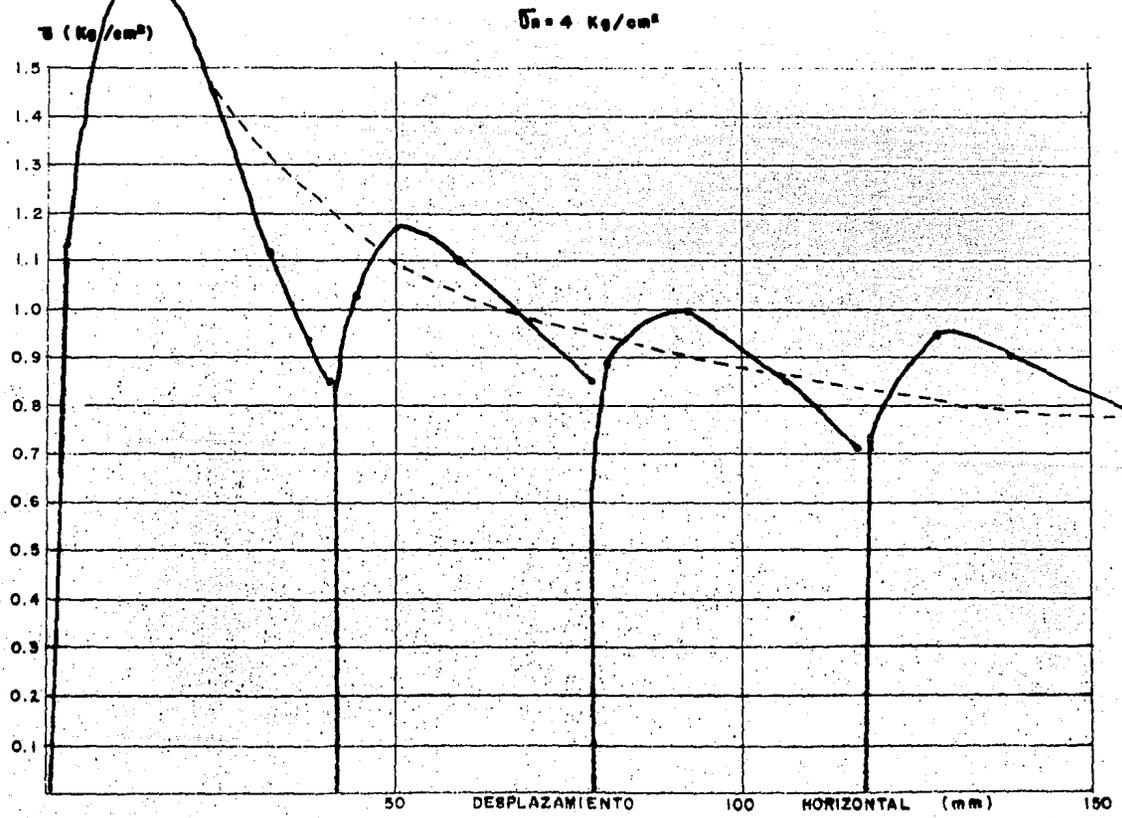


FIGURA 41 PRUEBA DE CORTE POR TORSIÓN EN EL KM. 15+500

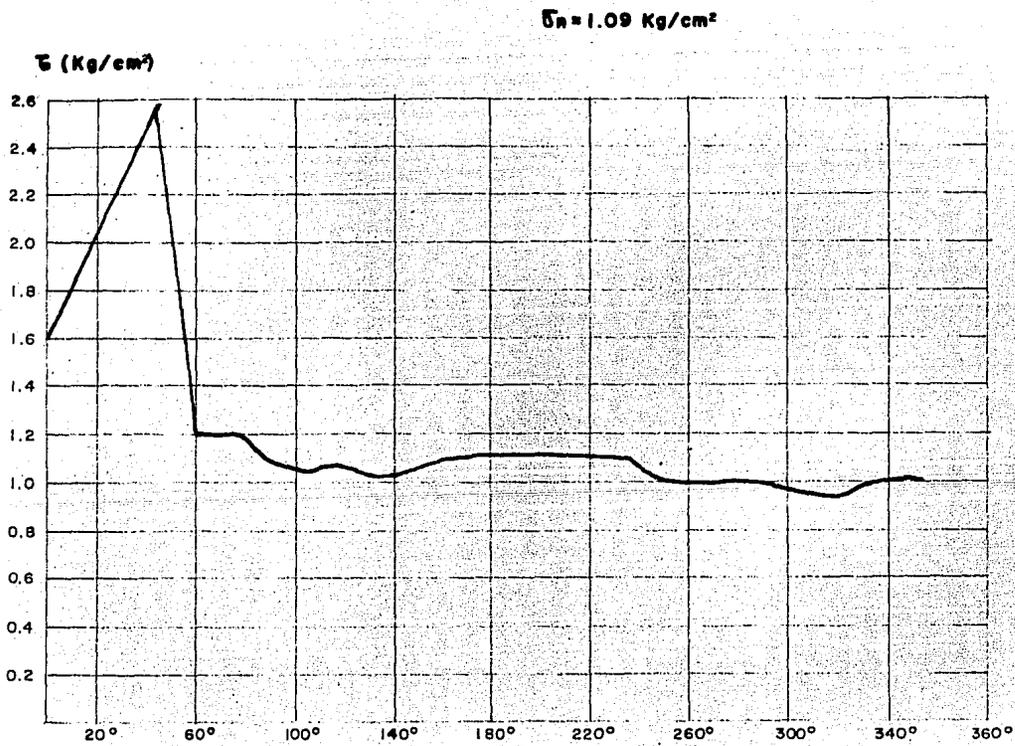


FIGURA 42 ENVOLVENTE DE MOHR PARA EL KM. 16+800

