



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"**

"ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA"

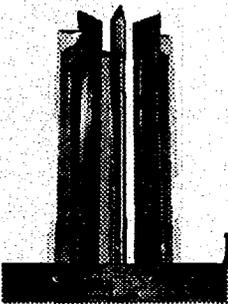
290234

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

ALEJANDRA GABRIELA VELAZQUEZ TORRES
DIRECTOR DE TESIS : ING. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ARAGON, ESTADO DE MEXICO,



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Papá: Gracias por tu apoyo, amor y confianza incondicional que me permitieron alcanzar mis metas e ideales

Mamá: Para ti mi respeto y agradecimiento no se que hubiera hecho sin tu apoyo y amor por creer siempre en mi

Tere y Rosalinda: En las buenas y en las malas siempre contarán conmigo

Abuelita Rosita: En donde quiera que te encuentres gracias por tus consejos y confianza

Al Ing. Gabriel Alvarez Bautista,

Por el tiempo que dedicó para la dirección y realización del presente trabajo

Mi agradecimiento a la *Universidad Nacional Autónoma de México*, en donde viví la oportunidad de mi vida, al superarme y darme con mis estudios una carrera de gran nivel para mi superación personal que nos brinda a todos los mexicanos.

Mi más profundo respeto a todos aquellos catedráticos y en especial a la *Escuela Nacional de Estudios Profesionales Campus Aragón*, entregados a la docencia universitaria por verter en mí y en todos mis compañeros sus conocimientos desinteresados, con el único fin de hacernos cada día, los mejores profesionistas y personas de provecho.

¡GRACIAS POR LO QUE HEMOS LOGRADO!

Índice	2
Introducción	3
I Introducción a la Ingeniería de taludes rocosos	10
1.1 Tipos de falla de taludes en roca.....	11
1.2 Información requerida para el diseño de taludes en roca.....	17
1.3 Evaluación del mecanismo potencial de falla.....	24
1.4 Evaluación de la resistencia al esfuerzo cortante.....	26
1.5 Métodos de estabilización.....	36
1.6 Instrumentación.....	38
1.7 Procedimiento constructivo.....	40
II Instrumentación de taludes en roca	41
2.1 Definición y objetivo de la instrumentación.....	42
2.2 Variables que pueden ser medidas en geotecnia.....	43
2.3 Tipos de instrumentos y principios de funcionamiento.....	44
2.4 Procedimiento general de instrumentación geotécnica.....	55
III Análisis de Estabilidad de taludes en medios fracturados	73
3.1 Planteamiento del problema y conceptos generales del cálculo de estabilidad.....	74
3.2 Método del cálculo de estabilidad de macizos rocosos en una superficie poligonal de deslizamiento.....	84
3.3 Cálculo de la estabilidad de bloques rocosos tridimensionales.....	87
3.4 Análisis de estabilidad de taludes en medios homogéneos.....	92
IV Análisis de estabilidad de un talud en roca utilizando vectores	102
4.1 Método por análisis vectorial.....	103
4.2 Análisis tridimensional de taludes en roca mediante operaciones vectoriales.....	107
Conclusiones	122
Bibliografía	126

INTRODUCCION

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación como son canales, caminos, construcción de presas de tierra y el desenvolvimiento de obras de protección han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de gran importancia ingenieril.

Tanto en el aspecto de inversión, como por el de consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy en día una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista.

Las rocas son materiales complejos, cuyo comportamiento esté influenciado por muy diversos y numerosos factores, desde su origen y formación hasta los efectos de tiempo, pasando por esfuerzos tectónicos de diversas magnitudes y repetición.

Usualmente se realizan ensayos de campo y de laboratorio para obtener los valores de las propiedades geotécnicas, pero los ensayos generalmente solo proporcionan un rango de posibles valores y el ingeniero usualmente tiene que utilizar su criterio para seleccionar los mas probables.

Además, en todos los trabajos de ingeniería geotécnica existen discrepancias entre la predicción obtenida del calculo y el comportamiento real de las estructuras, debido a hipótesis simplificadoras, incertidumbres y errores introducidos en los métodos de análisis y diseño.

En consecuencia, los diseños tienden a ser conservadores (factores de seguridad altos) y por consiguiente los costos elevados. Por otro lado, la falla significa la pérdida total de la obra, de instalaciones, y en ocasiones de vidas humanas.

Uno de los problemas que muy a menudo necesita resolver el ingeniero es el que corresponde a los fenómenos de inestabilidad de taludes en cortes y terraplenes.

Un talud no puede considerarse estable indefinidamente, por que tarde o temprano la estabilidad que pueda presentar se pierde debido a los agentes naturales tales como las presiones hidrostáticas, el intemperismo y la erosión.

Un aumento temporal de cargas, la reducción de la resistencia del suelo o la redistribución desfavorable de esfuerzos son causas que contribuyen de una u otra manera a que el talud busque su posición mas estable.

La estabilidad de los paramentos de un corte se confía a la resistencia propia del material que los forma y al valor soportante del suelo subyacente al pie del talud.

Antes de que puedan proyectarse con tino las obras necesarias para lograr la estabilización de un corte fallado o susceptible a la falla es conveniente aclarar con todo detalle a cual de todos los tipos de falla esta expuesto y cuales son las causas que pueden controlarse o eliminarse para conseguir una estabilidad adecuada.

Una de las ideas mas difundidas es la que un talud en roca es mas estable mientras menor sea su inclinación. Las teorías clásicas que no toman en cuenta las presiones hidrostáticas proporcionan algún fundamento a esta suposición.

Sin embargo, no solamente con el análisis teórico sino también con la observación de abundantes casos reales se ha venido a comprender que en determinadas circunstancias al abatir los taludes las condiciones de estabilidad empeoran en lugar de mejorar.

Es solo para taludes con inclinación menor de 50 grados que se observa un beneficio importante al disminuir la pendiente del talud. Si se comparan los factores de seguridad de un talud con presiones hidrostáticas y sin ellas se observara que el aumento que se tiene en la estabilidad es sumamente importante cuando se logra eliminar dichas presiones.

En consecuencia, la atención debe dirigirse principalmente hacia obras de drenaje internas y externas que eviten la penetración del agua de lluvia, su acumulación en depresiones mal drenadas, su absorción en estratos permeables o en zonas de mucha vegetación que la alimentan en forma gradual al suelo y mantienen un grado de saturación, y finalmente debe considerarse la posibilidad de interceptar las corrientes de agua que provengan de puntos alejados o aun de niveles mas profundos.

El método mas sencillo para conseguir taludes estables es darles su pendiente natural, muy a menudo esto solo se puede realizar en campo abierto, pues aumenta considerablemente la extensión de la obra.

Cualquier clasificación debe considerar en primer lugar que la ruptura de un talud rocoso puede ocurrir de formas muy diferentes. Cuando un talud muestra inestabilidades se pueden corregir con muchas medidas diferentes, conjuntamente o por separado.

El estudio de un talud rocoso potencialmente inestable requiere de un cuidadoso estudio de campo, un análisis detallado y un buen sentido ingenieril para valorar la importancia relativa de los diferentes factores de inestabilidad que pueden estar actuando.

Ningún sistema de clasificación puede sustituir todo este trabajo, pero puede ser de gran utilidad indicando los limites habituales de uso para cada clase de medidas de corrección.

Al efectuar un análisis de estabilidad a menudo hay que variar los valores de los parámetros involucrados, pues es conveniente suponer diferentes condiciones a las que esta sujeto un mismo talud.

I CAPITULO. Se hace mención sobre la importancia de contar con todos los datos de la obra civil dependiendo de la etapa en la que se encuentre; anteproyecto, proyecto ejecutivo, construcción y operación.

Se hace especial referencia a la importancia que tienen las discontinuidades del macizo rocoso en la evaluación de estabilidad de taludes, haciendo una detallada descripción de las mismas a partir del reconocimiento de campo.

Para esto se tienen que hacer ensayos y pruebas de laboratorio como pueden ser ensayos de corte "in situ", corte directo, pruebas triaxiales por mencionar algunas.

Así mismo se verán algunos métodos de estabilización para evitar fallas en taludes cabe mencionar que estos métodos son básicamente preventivos y se utilizan para aumentar las fuerzas resistentes, así como la de disminuir las fuerzas actuantes en el talud.

Se debe de poner especial atención en el proceso constructivo ya que tiene un gran impacto en la estabilidad propia del talud por lo que hay que evitar una descompensación instantánea del talud que produzca deformaciones iniciales y por lo mismo una pérdida de resistencia al corte en la superficie de falla.

II CAPITULO. Se hace mención de la importancia de la instrumentación de taludes en roca ya que es toda una especialidad dentro del campo de la geotecnia, nos permite conocer el comportamiento de dichos taludes bajo condiciones de cargas normales o extraordinarias con el fin de evaluar su seguridad.

Así mismo la instrumentación permite detectar oportunamente cambios o deficiencias en la estabilidad propia del talud, durante su construcción y operación posterior para así poder corregir cualquier anomalía oportunamente.

Sé vera brevemente los tipos de instrumentación y sus principios de funcionamiento ya que para una detallada descripción y utilización de los mismos se deberán consultar catálogos y manuales para conocer sus características y funcionamiento de un determinado aparato antes de decidir su utilización en un proyecto dado.

III CAPITULO. Se evaluará la estabilidad de macizos rocosos, en la practica ingenieril para poder determinar la estabilidad o resistencia de un talud se deberá utilizar un coeficiente de seguridad que generalmente se entiende como la relación entre las fuerzas de retención y las fuerzas de empuje.

En los cálculos de estabilidad de taludes rocosos se relaciona el coeficiente de seguridad con la resistencia al esfuerzo cortante existente en una sección determinada.

Se hará mención de varios criterios así como de métodos de estabilidad ya que cada uno de ellos tienen sus ventajas y deficiencias.

Cualquier método de calculo de estabilidad de taludes rocosos debe considerarse como un instrumento de análisis cualitativo para obtener diferentes factores de estabilidad que permitirán analizar el comportamiento del talud rocoso.

IV CAPITULO. En el ultimo capitulo se hace referencia a la estabilidad de un talud utilizando vectores para encontrar el factor de seguridad, el cual es un valor numérico que indica cuales son las fuerzas que se oponen al movimiento en relación a las fuerzas motoras.

Todo esto con el objeto de conocer si la cuña tienden a deslizarse y conocer la posible dirección y superficie por donde ocurrirá la falla.

CAPITULO I

INTRODUCCION A LA INGENIERIA

DETALLES ROCOSOS

I INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE TALUDES ROCOSOS

Un talud es una superficie inclinada respecto a la horizontal que adoptan las estructuras de roca. Los taludes pueden ser naturales o creados por el hombre mediante excavaciones (cortes).

En un macizo rocoso con taludes naturales ó excavados, los problemas de inestabilidad se deben fundamentalmente, al carácter estructuralmente discontinuo del mismo y a las cambiantes condiciones locales de alteración y calidad de las rocas.

El número de discontinuidades y sus características geométricas (inclinación y orientación) con relación a la inclinación y orientación de los cortes naturales o artificiales, determinarán si las condiciones de falla de un talud son cinemáticamente posibles, y en caso de serlo, la calidad de la roca intacta y las características físicas (persistencia, rugosidad, grado de alteración, apertura, existencia de relleno, etc.), mecánicas (especialmente resistencia al corte) e hidráulicas (permeabilidad) de las discontinuidades, así como la relación entre las fuerzas motoras actuantes (carga muerta o viva en la corona del talud, peso propio de la masa rocosa, sismo y empujes hidráulicos) que tienden a mover un determinado volumen de roca y las fuerzas resistentes (componente normal de las cargas muertas o vivas sobre el talud y del peso propio de la masa rocosa y resistencia al corte de la roca ó de las discontinuidades) que actúan en la superficie de falla y que tratan de impedir el movimiento del talud, permitirán determinar las condiciones de equilibrio de la masa rocosa y definir si ésta resulta estable o inestable.

La mayor dificultad en el proceso de estudio y diseño de un talud, estriba en lograr una acertada definición de la superficie potencial de falla y en determinar sus características físicas, mecánicas e hidráulicas, por lo que debe concentrarse la mayor atención hacia este objetivo, realizando una intensa campaña de exploración y eligiendo las pruebas de laboratorio y campo necesarias para alcanzar este fin.

Si este objetivo se cumple será posible, con la ayuda de la herramienta analítica adecuada, definir la estabilidad de la masa rocosa, así como también la instrumentación requerida, el método constructivo y las soluciones de soporte más convenientes para garantizar la integridad del talud y la seguridad de la obra.

A) TIPOS DE FALLAS DE TALUDES EN ROCA

El tipo de mecanismo potencial de falla de talud está controlado básicamente por el número y naturaleza de las discontinuidades existentes y por su distribución geométrica en el macizo rocoso. Si no existen discontinuidades la roca se considera masiva y el mecanismo de falla ocurrirá por la roca intacta o matriz

Los casos más usuales de falla de talud conocidos son los siguientes:

- ❖ Falla circular o de rotación
- ❖ Falla por traslación o deslizamiento por uno o más planos de fracturas
- ❖ Falla por volteo

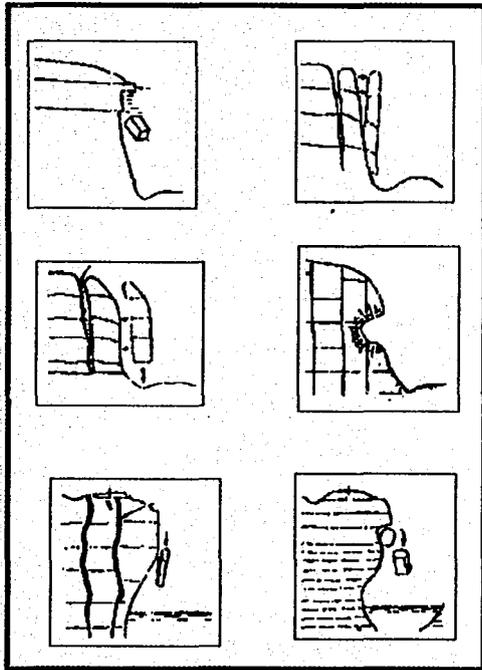
Existen además fallas que ocurren en menor frecuencia, aunque no por eso resultan menos importantes, ya que algunas involucran grandes volúmenes de roca y depósitos de talud tales como las denominadas fallas por flujo plástico (creep). También se presentan algunos casos particulares de fallas en las que ocurren combinaciones de mecanismos de falla, las cuales se conocen como fallas compuestas, así como fallas poligonales debidas a cambios de dirección de la superficie de falla y fallas locales debidas a pérdida de apoyo de bloques por erosión al pie de los mismos.

Las fallas por rotación y por flujo plástico son más frecuentes en suelos y las de traslación o deslizamiento, en mayor número que las de volteo, ocurren con mayor frecuencia en masas rocosas. La falla por rotación se presenta también en rocas que se encuentran densamente fracturadas o alteradas o en rocas masivas granulares con baja cementación entre partículas, y se considera que el mecanismo de falla es similar al de un suelo granular.

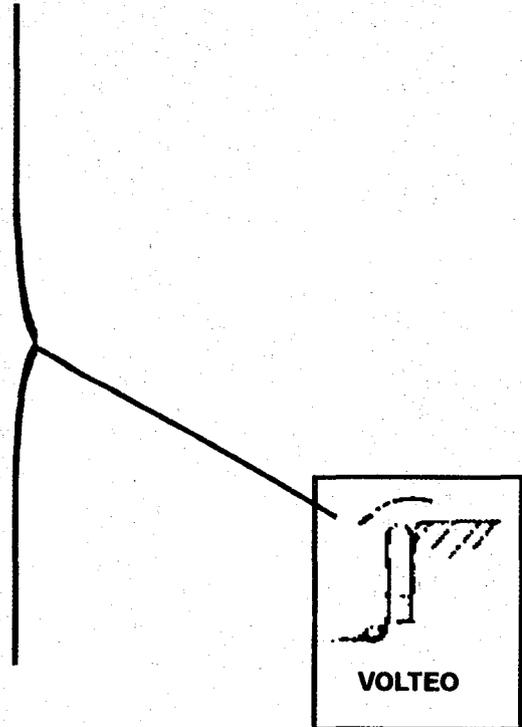
Las siguientes figuras muestran diversos casos de falla en laderas naturales y en taludes excavados, con mecanismos de falla por rotación, deslizamiento (a lo largo de uno y dos planos) y volteo, así como algunos casos de fallas locales inducidas por explosivos, por erosión o por alteración, fallas poligonales y fallas compuestas.

Las dificultades para definir la superficie de falla crecen en función directa a la complejidad de la estructura geológica.

Los problemas de estabilidad para los mecanismos de falla mencionadas anteriormente pueden caer dentro de las categorías de falla local y falla general del talud que afectan, respectivamente, a solo una porción del talud o a la totalidad del mismo.

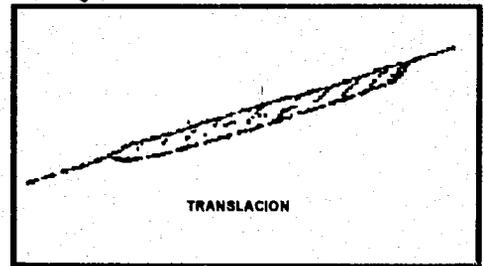
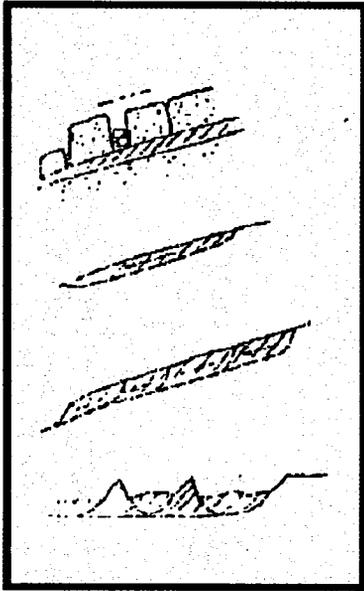


DESPRENDIMIENTOS

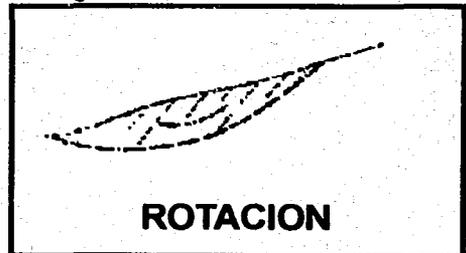
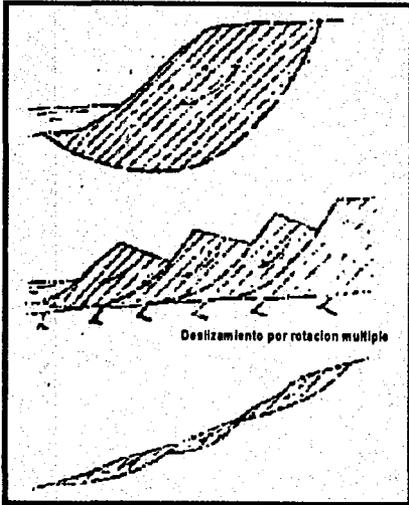


VOLTEO

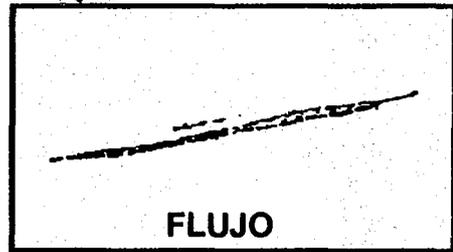
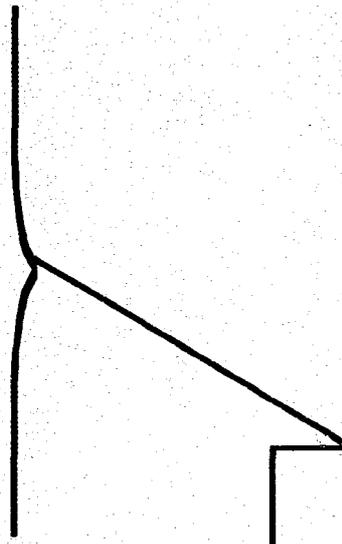
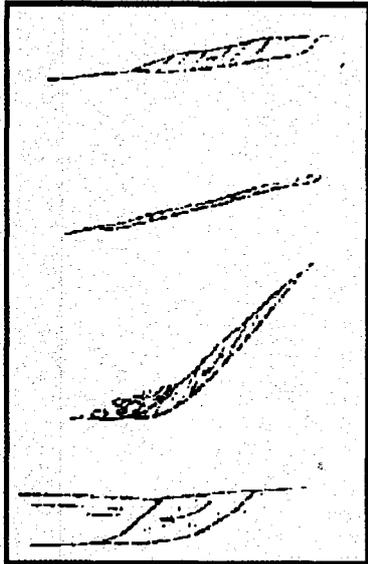
MECANISMO DE FALLA POR VOLTEO



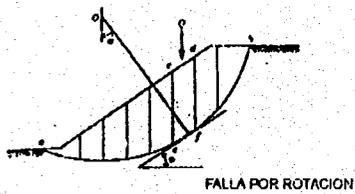
**FALLA POR TRANSLACIÓN O
DESLIZAMIENTO POR UNO O MAS
PLANOS DE FRACTURAS**



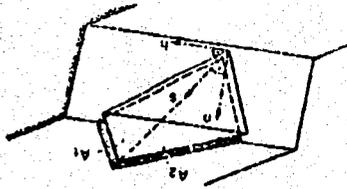
FALLA CIRCULAR O DE ROTACION



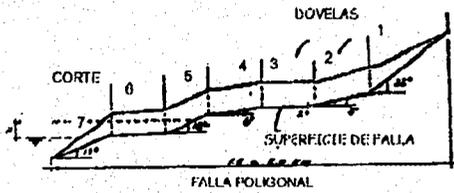
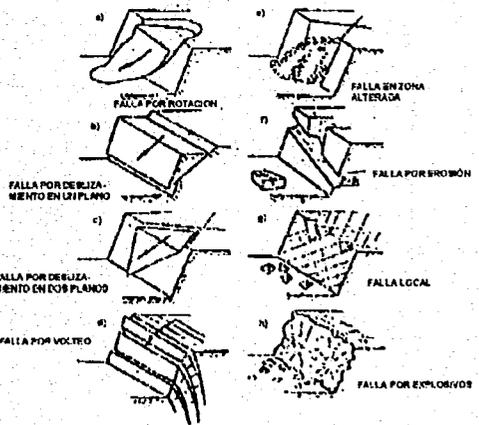
FALLA POR FLUJO PLASTICO



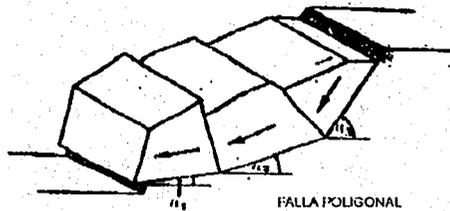
FALLA POR ROTACION



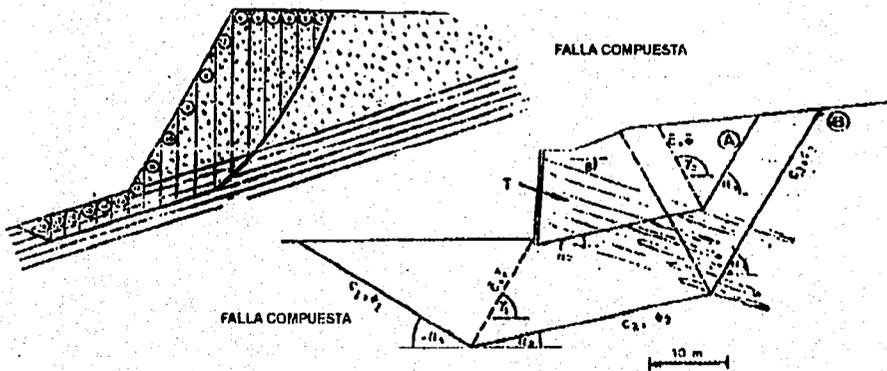
FALLA POR DESLIZAMIENTO EN DOS PLANOS



FALLA POLIGONAL



FALLA POLIGONAL



FALLA COMPUESTA

FALLA COMPUESTA

MECANISMOS DE FALLA EN TALUDES

B) INFORMACION REQUERIDA PARA EL DISEÑO DE TALUDES EN ROCA

Para diseñar un talud en un macizo rocoso es preciso conocer con diferentes grados de detalle los siguientes aspectos:

- a) Tipo de obra a realizar
- b) Topografía de la zona
- c) Región sísmica y coeficientes de aceleración local de la corteza
- d) Modelo geológico - geofísico de la masa rocosa que incluirá los siguientes datos:
 - ❖ cobertura de suelo y depósitos de talud o rellenos
 - ❖ unidades litológicas
 - ❖ estructura geológica regional y local
 - ❖ zonas de alteración o de mayor densidad de fracturamiento
- e) Niveles freáticos y niveles de agua externa en la cara del talud
- f) Propiedades índice y mecánicas de la roca intacta
- g) Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades identificadas como posibles superficies de falla (fracturas, estratos, fallas, contactos, etc.)
- h) Propiedades hidráulicas de la masa rocosa
- g) Procedimiento constructivo

El grado de detalle requerido para obtener toda esta información básica dependerá de la etapa en que se encuentre la obra (esquema conceptual, anteproyecto, proyecto ejecutivo, construcción u operación) y de la importancia de la obra misma en cuanto a funcionalidad, inversión económica, seguridad para los trabajadores y usuarios y requisitos de seguridad para las instalaciones durante las etapas constructivas y de operación.

Es preciso contar con todos los datos de la obra civil o minera en la etapa en que se encuentre, que muestre el tipo de obra, sitio donde se emplazará, su dimensionamiento, niveles de desplante y de rasantes, niveles máximos de extracción de mineral, niveles extremos del agua en el caso de obras hidráulicas (canales, obras de toma, vertedores, embalses, etc.) y de puentes; así como las cargas máximas estáticas y dinámicas que se transmitirán al terreno al pie del talud o en su corona.

La topografía del sitio donde se emplazará la obra deberá presentarse en planos a escala adecuada y curvas de nivel con separación desde un metro, 5m. hasta a cada 25 ó 50m, según el tamaño y características de la obra, y podrá ser producto de restitución fotogramétrica o de levantamientos detallados del sitio.

Dependiendo de la naturaleza de la obra a realizar y del grado de riesgo existente por afectación a instalaciones, usuarios o a asentamientos humanos, se hará un estudio local de riesgo sísmico particular para el proyecto estableciendo los parámetros de respuesta dinámica del terreno y las aceleraciones máximas esperadas, o bien, tan sólo se recurrirá a la información regional existente de sismicidad y coeficientes sísmicos elaborada por institutos de investigación o dependencias gubernamentales o privadas.

El modelo geológico - geofísico del macizo rocoso es de vital importancia para el estudio de taludes y de éste depende en gran medida lo acertado del diseño de nuevos taludes o del proyecto de estabilización de taludes existentes. Este modelo debe ser conformado por geólogos y geofísicos vinculados con las obras mineras o civiles que tengan pleno conocimiento de los rasgos geológicos más significativos que deben considerarse en el estudio de taludes para estas obras.

El modelo se obtendrá mediante un procedimiento de exploración planeado a partir del conocimiento de la obra, así como de la recopilación y procesamiento preliminar de la información disponible de la zona de estudio (cartas geológicas, estudios geológicos regionales y locales previos, fotografías aéreas, etc.) y de un reconocimiento de campo a semidetalle y a detalle del sitio.

La información disponible permitirá tener el marco geológico básico, consistente en: provincia geológica e hidrológica, origen de la formación y edad, tipos de roca existentes y rasgos estructurales mayores (fallas regionales y locales, presencia de sinclinales, anticlinales, cabalgaduras, diques, contactos litológicos, estratigrafía, etc.).

El reconocimiento de campo realizado a partir de la observación de afloramientos existentes en cañadas naturales, morfología del relieve y cortes naturales o excavados, es fundamental para realizar ajustes a la información previa y para identificar con detalle la litología y su calidad, así como las áreas de cobertura de suelo y depósitos de talud, zonas de roca intemperizada y alterada, estructuras mayores y menores y sus características principales. En esta etapa deben identificarse los rasgos geológicos verdaderamente significativos que permitan estimar el potencial mecanismo de falla actuante. En muchos casos en los sitios de estudio han ocurrido ya fallas de taludes las cuales permiten acercarse a la definición del mecanismo de falla esperado.

Al concluir las etapas previas, se tendrán elementos para programar la exploración mediante zanjas, socavones y perforaciones de avance o con recuperación de núcleos y la exploración indirecta mediante métodos geofísicos (sísmica de refracción y eléctrica) la cual deberá enfocarse a conocer a profundidad la litología y estructura del macizo rocoso y su calidad, así como las características de los materiales de cobertura (suelos y depósitos de talud). La cantidad, método a utilizar y ubicación de la exploración dependerá de la complejidad del macizo rocoso.

Los métodos directos permitirán recuperar muestras para su análisis y para realizar ensayos de laboratorio en núcleos de roca intacta, que permitan determinar las propiedades, índice y mecánica de la roca. Las propiedades hidráulicas de la roca intacta, no resultan ser tan relevantes para fines de diseño de taludes.

Los métodos indirectos dan valiosa información de los espesores de suelo, depósitos de talud o con alto grado de fracturamiento, además permiten conocer los sitios y profundidades donde la roca es excavable con tractor o con explosivos.

Los barrenos realizados para la exploración directa pueden ser utilizados para la instalación de piezómetros e inclinómetros y para realizar ensayos de permeabilidad tipo Lugeón o Lefrane en la masa rocosa. Los piezómetros se instalan para la medición de niveles de agua y para conocer la magnitud de las presiones hidrostáticas y los inclinómetros para medir deformaciones del terreno e identificar la profundidad a la que se encuentra la superficie de falla cuando se tiene evidencia de movimientos y no, se ha definido aún con precisión la superficie de falla.

Debido a la importancia que las discontinuidades tienen en la evaluación de la estabilidad de los taludes, se debe poner especial atención en este aspecto, haciendo una detallada descripción de las mismas, especialmente a partir del reconocimiento de campo, más que de los núcleos recuperados, la descripción debe contemplar básicamente los siguientes diez parámetros que se definen a continuación;

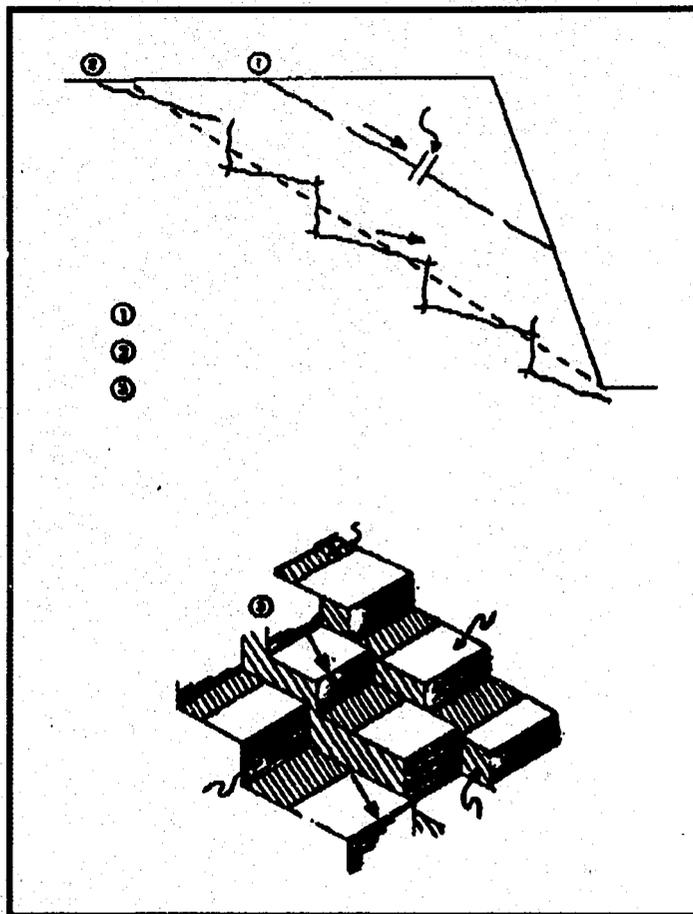
Orientación. Inclinación y rumbo de la discontinuidad en el espacio. La discontinuidad (falla, junta, fractura, grieta, fisura, plano de estratificación, contacto, etc.) se representa como un plano, midiendo en campo azimutalmente la dirección del echado real (línea de máxima inclinación del plano) y su inclinación respecto a la horizontal, con frecuencia estos planos se alabea y cambian de dirección, por lo que deben medirse a lo largo de toda la traza de la discontinuidad.

Espaciamento. Distancia perpendicular entre las discontinuidades de cada una de las familias existentes

ESPACIAMIENTO	INTERVALO
Extremadamente cercano	< 20 mm
Muy cercano	20 - 60 mm
Cercano	60-200 mm
Moderado	200-600 mm
Amplio	600-2000 mm
Muy amplio	2000- 6000 mm
Extremadamente amplio	>6000 mm

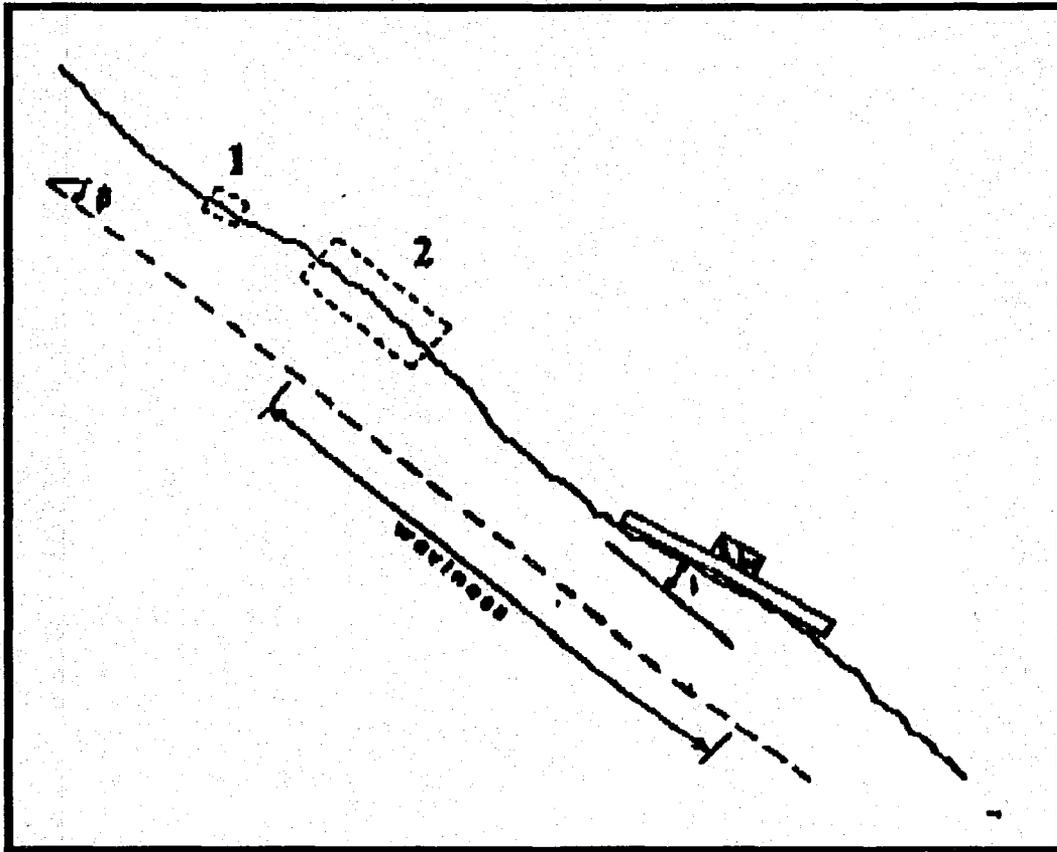
Persistencia. Longitud o continuidad de la traza de la fractura o discontinuidad, la cual da una medida aproximada de la longitud de penetración de la propia discontinuidad en el macizo rocoso. La terminación de la discontinuidad puede ocurrir en la propia roca, o bien contra otra discontinuidad de dirección diferente. Esta propiedad es uno de los más importantes parámetros de la masa rocosa y el más difícil de cuantificar. Tiene un notable impacto en la resistencia al corte ya que determina el número de "puentes" de roca intacta que estarían presentes en una potencial superficie de falla.

PERSISTENCIA	INTERVALO
Muy baja	< 1 m
Baja	1-3 m
Media	3-10 m
Alta	10-20m
Muy alta	> 20m



EJEMPLOS PERSISTENCIA EN DISCONTINUIDADES

Rugosidad. Incluye la forma, tamaño y frecuencia de las protuberancias o irregularidades existentes en la superficie de la discontinuidad que sobresalen con respecto al plano medio de la misma. La escala de éstas irregularidades es de gran importancia, ya que la discontinuidad puede ser ondulada y las crestas de las ondulaciones pueden ser de diferentes alturas y haber diferentes distancias en las mismas. Si estas ondulaciones son de gran escala, (varios metros de distancia entre los mismos), contienen en su propia superficie otras protuberancias de menor escala que definen su rugosidad, por lo que pueden establecerse diferentes grados de rugosidad en función de la continuidad de la fractura y de su escala, con relación al tamaño del talud que se analiza.

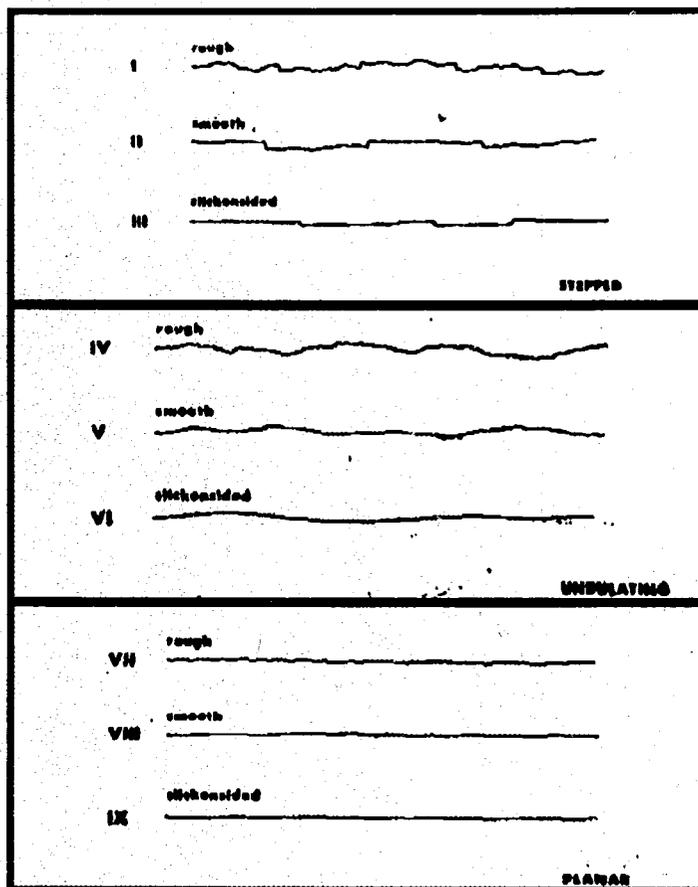


DIFERENTES ESCALAS DE RUGOSIDAD EN UNA DISCONTINUIDAD

Esta propiedad tiene un efecto notable en la resistencia al esfuerzo cortante como se explica mas adelante.

Pueden definirse tres tipos de superficies de la discontinuidad conocidos como superficie escalonada, superficie ondulada y superficie lisa, agrupados por su rugosidad de la siguiente manera:

- ❖ Superficie de la fractura
- ❖ Escalonada rugosa
- ❖ Escalonada suave
- ❖ Escalonada lisa
- ❖ Ondulada rugosa
- ❖ Ondulada suave
- ❖ Ondulada lisa
- ❖ Plana rugosa
- ❖ Plana suave
- ❖ Plana lisa



PERFILES DE RUGOSIDAD Y NOMENCLATURA SUGERIDA

Resistencia de las paredes. Es la resistencia equivalente a compresión de las paredes de la discontinuidad, las cuales pueden ser de menor resistencia que el resto de la roca intacta, debido al efecto de intemperismo y alteración local.

Apertura. Es el espacio distancia perpendicular, existente entre las paredes de la discontinuidad, el cual puede estar ocupado por agua, aire o un relleno sólido.

Relleno. Material sólido que ocupa el espacio correspondiente entre las paredes de la discontinuidad y que usualmente es de menor calidad que la roca intacta (limos, arcillas, brechas, milonita, lutitas, etc.). En un número menor de casos se presentan rellenos de intrusiones ricas en sílice que hacen que el relleno sea de mejor calidad que la roca encajonante.

Filtración. Flujo de agua o humedad visible en el interior de la discontinuidad.

Numero de familias. Comprende a los sistemas de discontinuidades con diferentes orientaciones e inclinaciones que pueden agruparse en familias, las cuales por su número pueden agruparse en familias principales o primarias (las de mayor número de discontinuidades), familias secundarias y de tercer orden o menor.

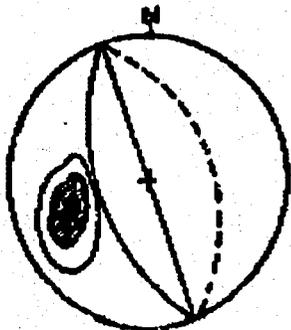
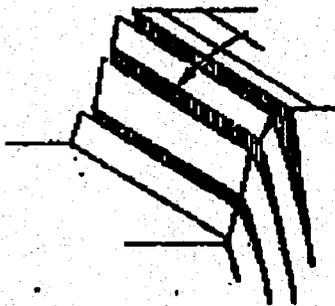
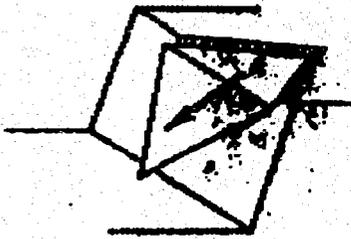
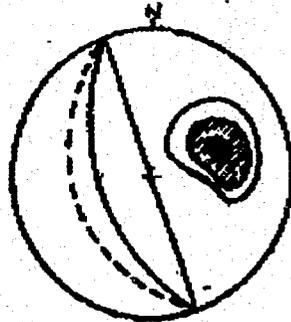
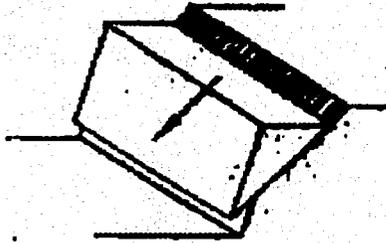
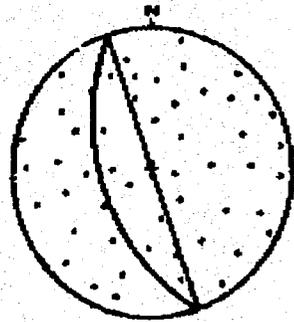
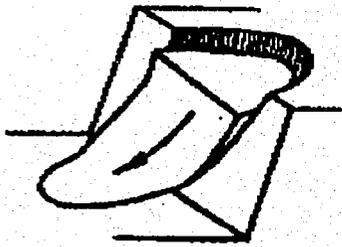
Tamaño de bloque. Es la dimensión de los bloques delimitados por las familias de fracturas existentes que se intersectan y las cuales también determinan su forma.

C) EVALUACION DEL MECANISMO POTENCIAL DE FALLA

La representación de las discontinuidades en el macizo rocoso, mediante el uso de la proyección estereografía, permite visualizar con gran objetividad las principales familias de fracturas y sus características geométricas y permite reconocer eficientemente los problemas potenciales de inestabilidad de taludes a partir de la orientación de las familias de fracturas, con relación a la orientación del plano de la cara del talud, además es posible conocer también la geometría del bloque inestable y la posible dirección y superficies por donde ocurrirá la falla.

La siguiente figura muestra cuatro de los principales tipos de fallas de taludes y su respectiva representación estereográfica del plano de la cara del talud (con línea continua) y la representación con líneas discontinuas y con polos (agrupados en zonas de concentración, excepto en el caso de falla circular) de las principales familias de discontinuidades del macizo rocoso.

Falla Circular



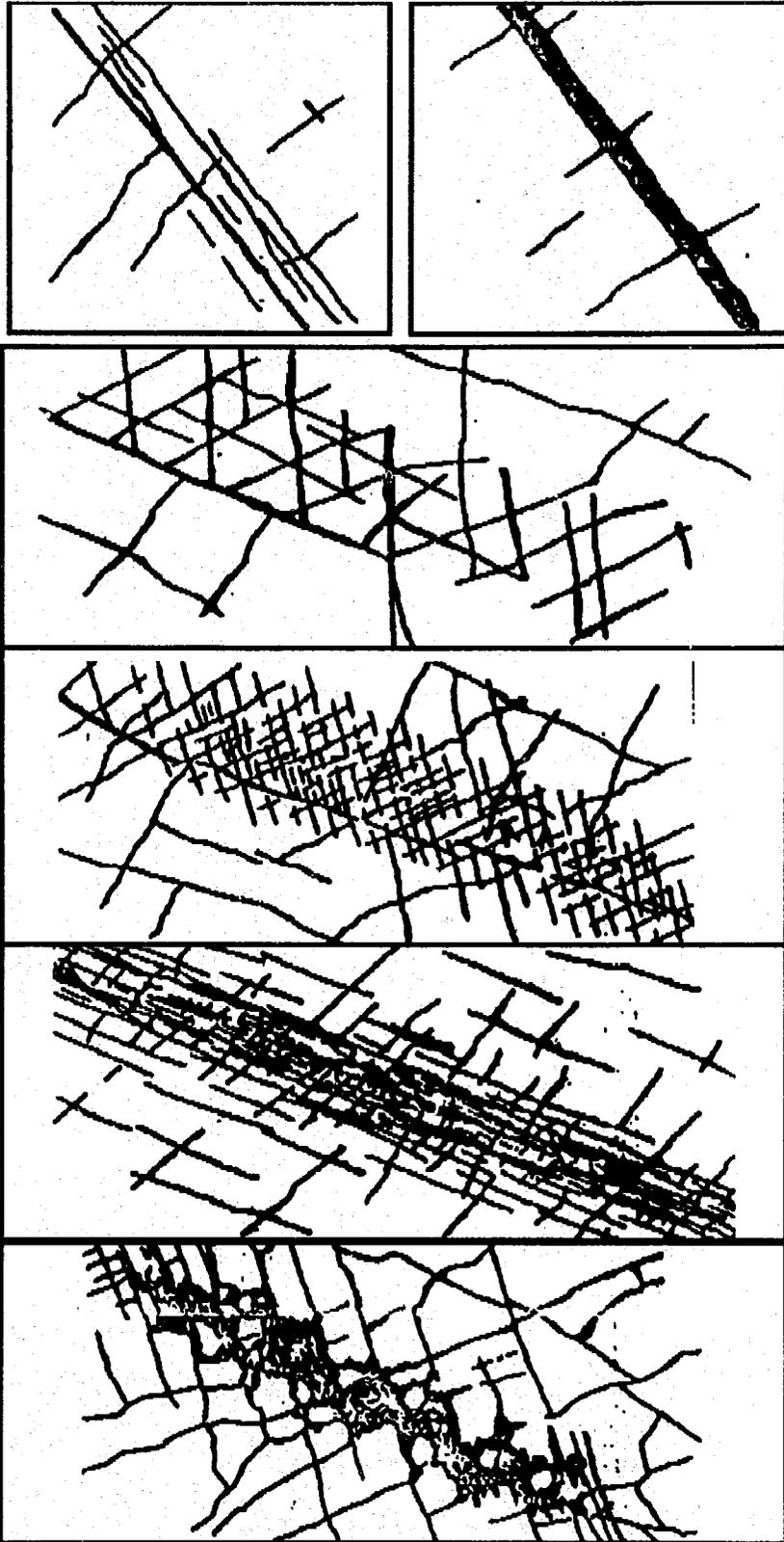
**MECANISMOS DE FALLA MAS USUALES EN TALUDES Y
SU REPRESENTACION ESTEREOGRAFICA**

Hasta el momento, esta información sólo hace posible identificar, los sitios que reúnen condiciones cinemáticamente admisibles para que se presente un problema de inestabilidad. En una etapa posterior deben evaluarse además las propiedades mecánicas tanto de la roca intacta como de las discontinuidades, especialmente en relación con la resistencia al esfuerzo cortante en la superficie de falla previamente definida, para incorporarla a los métodos de análisis de estabilidad estereográficos, analíticos o numéricos.

D) EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La resistencia al esfuerzo cortante en la superficie de falla varia en función de la existencia o no de relleno en la misma y de las características mecánicas tanto del relleno como de la roca intacta. El relleno puede ser de material triturado o milonitizado, o bien, puede ser un depósito sedimentario, depósitos de solución, o de algún otro tipo. El espesor de relleno puede ser también muy variable e incluso pueden a menudo presentarse superficies complejas como las mostradas en la figura siguiente. En algunos casos el relleno no permite que entren en contacto las caras de la discontinuidad por lo que la resistencia al corte esté gobernada por el relleno. En otros casos, las caras de la discontinuidad están parcialmente en contacto y el resto esta en contacto con el relleno y existen casos en que no hay relleno y las caras de la discontinuidad están totalmente en contacto quedando, la resistencia al corte, gobernada por las propiedades de la roca intacta.

En cualquier caso la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante solo será posible conocerla haciendo ensayos de resistencia al corte en laboratorio y en campo.



EJEMPLOS DE DISCONTINUIDADES COMPLEJAS

Lo más recomendable es hacer ensayos de corte directo "In situ" (figuras 1 y 2) de donde se obtendrán resultados más representativos, ya que involucran al conjunto roca intacta y relleno en condiciones naturales. Los ensayos de corte directo en laboratorio son menos recomendables pues debe considerarse que los ensayos se harían en muestras de menor tamaño pudiendo afectar los resultados, por otro lado, el labrado y transporte de las muestras causa alteración de las mismas y los parámetros de resistencia obtenidos de estas muestras pueden diferir, en algunos casos considerablemente, de la resistencia al corte real en la superficie de falla.

En el caso de que el relleno controle el comportamiento de resistencia al corte, esta propiedad puede evaluarse con ensayos propios de la mecánica de suelos, tal como las pruebas triaxiales o de corte directo. De las pruebas triaxiales se obtiene una envolvente de falla a partir de la cual puede trazarse una línea tangente a la misma para el nivel de esfuerzo normal efectivo actuante en la superficie de falla y se obtendrán los parámetros de resistencia denominados cohesión y ángulo de fricción, que define la resistencia al corte mediante la expresión general de Coulomb.

$$\tau = c + \sigma' n \tan \Phi$$

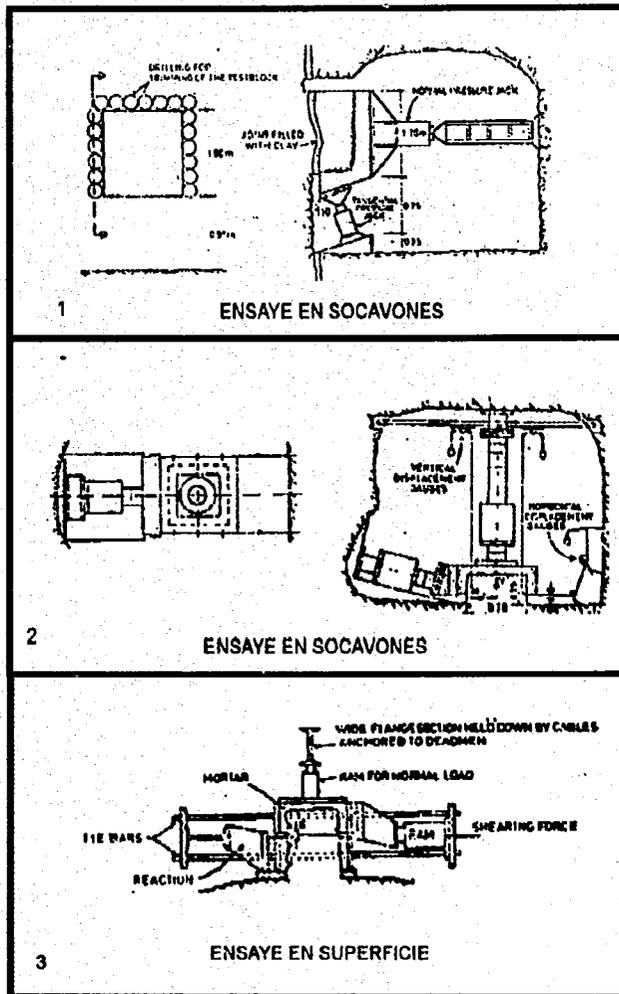
donde:

- τ = resistencia al esfuerzo cortante
- Φ = ángulo de fricción
- $\sigma' n$ = esfuerzo normal efectivo
- c = cohesión

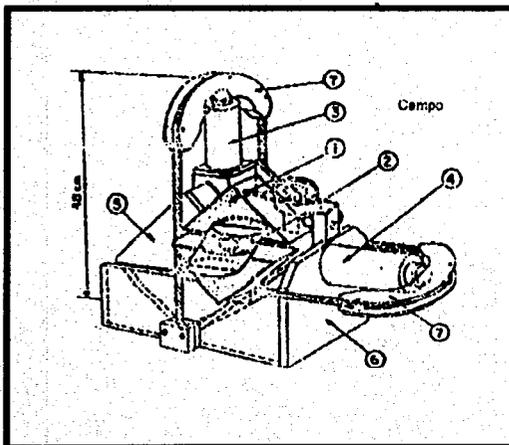
En la prueba de corte directo como la mostrada en la figura 1, se aplica una fuerza normal a la muestra, equivalente a la que tendrá la superficie de falla en el talud y se aplica carga tangencial hasta llevar la muestra a la falla, midiendo durante el proceso las deformaciones tanto en el sentido normal (dilatancia) como en el sentido tangencial. En el caso particular del dispositivo de prueba de la figura 1, la línea de acción del gato hidráulico inclinado que transmite la fuerza tangencial, debe pasar por el centro del área de discontinuidad para evitar que se generen momentos. Con los valores de esfuerzo cortante aplicado y de formación tangencial, se construyen gráficas como la de la figura 3. Por lo general, un mínimo de tres pruebas es necesario para obtener un valor pico de cortante máximo y un valor residual de cada prueba, y con estos valores construir la gráfica de la figura 4, que es representativa del comportamiento de resistencia al corte de la discontinuidad y a partir de la cual se obtienen los valores máximos (pico) y mínimos (residual) del ángulo de fricción.

Para el diseño del talud tendremos que predecir la condición más desfavorable de resistencia, la cual estará basada en la resistencia residual. Hay que tomar en cuenta que el valor de resistencia máxima puede ser afectada por varios valores tales como: desplazamientos previos y falla progresiva, intemperismo, subpresión y otros.

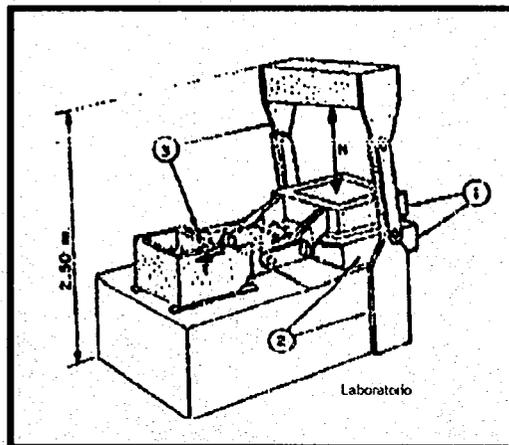
FIGURA 1



A. Ensaye de corte en campo

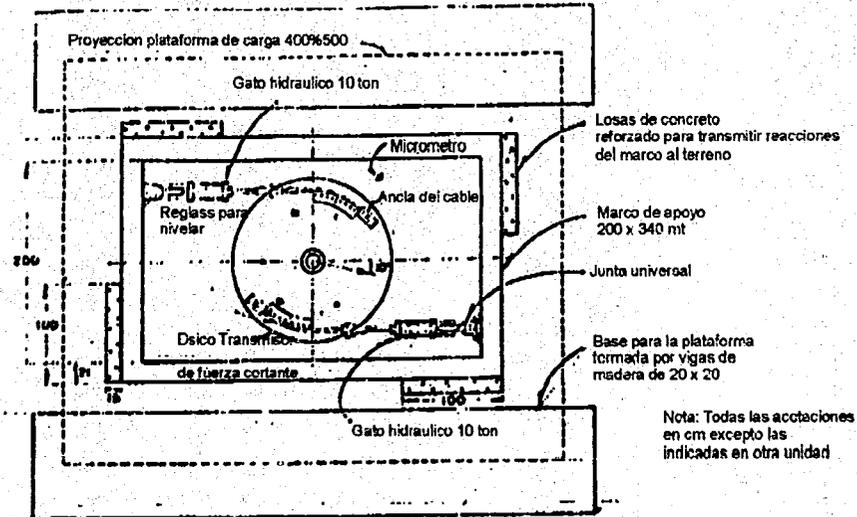


B. Ensaye de corte realizadas en nucleos de roca

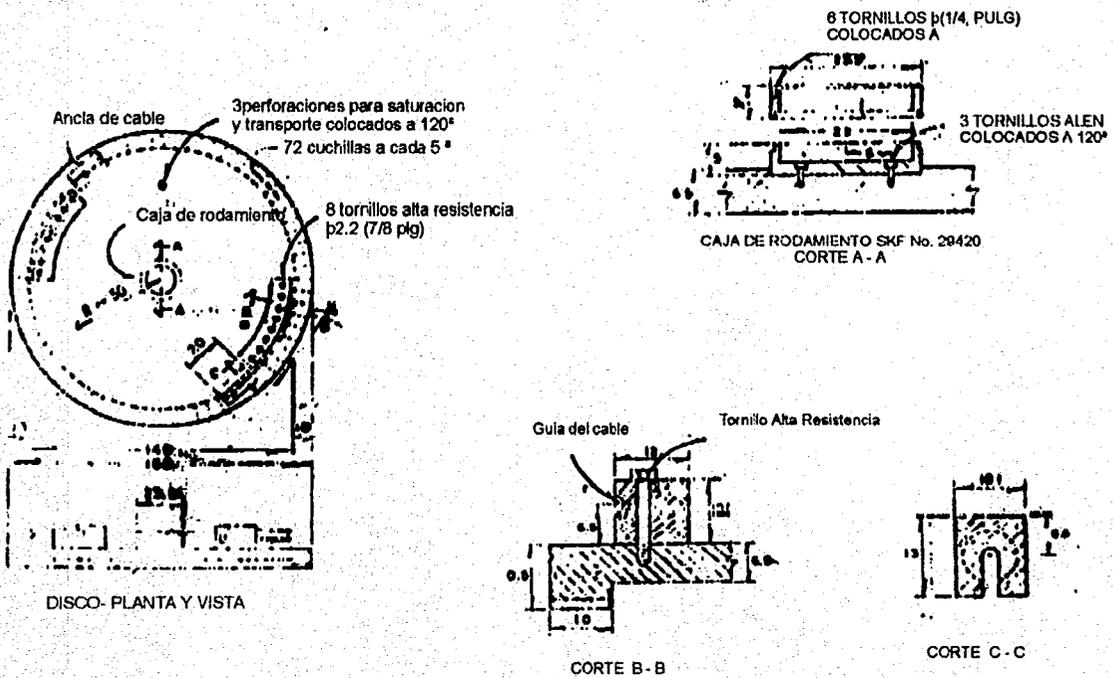


C. Ensaye de corte directo en muestras cúbicas de laboratorio

FIGURA 2

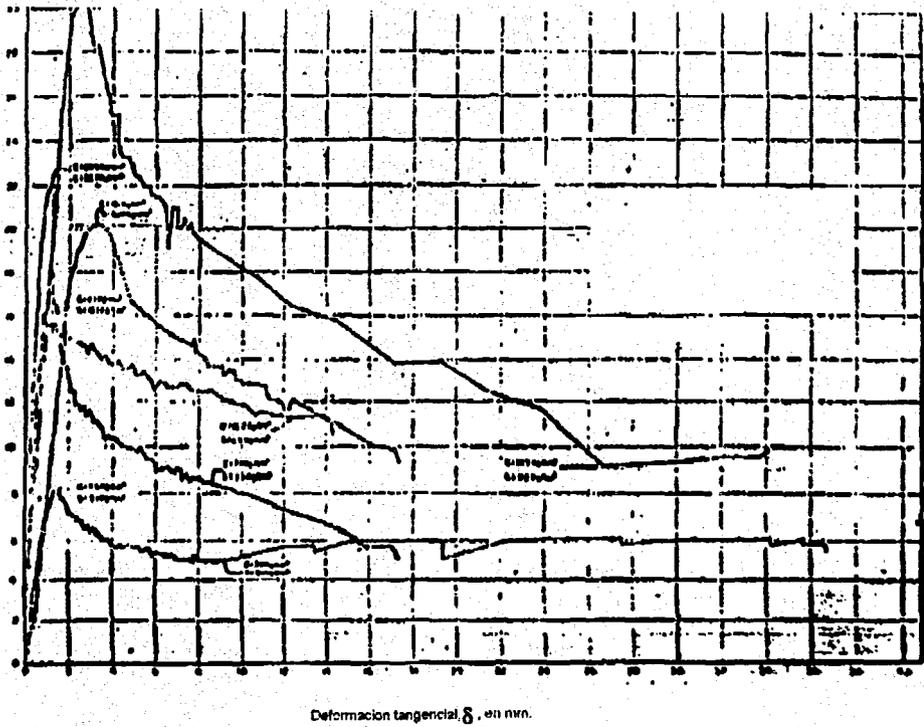


PLANTA GENERAL



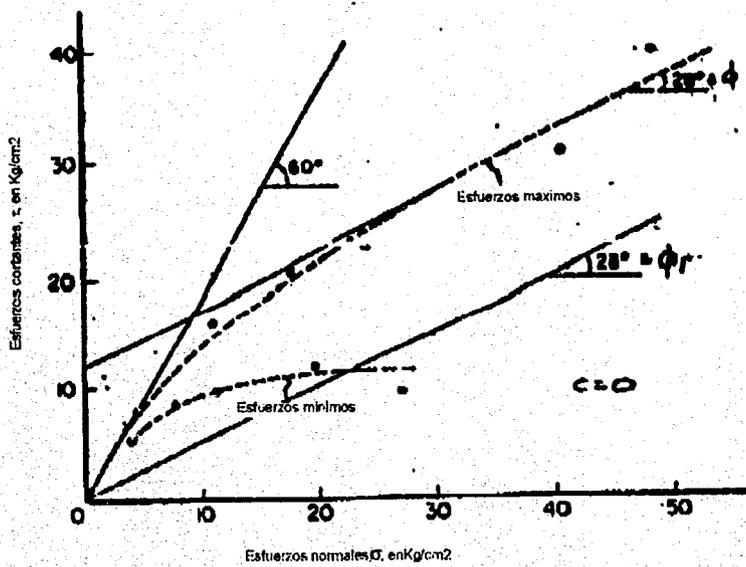
Ensayo de corte directo aplicando carga radialmente

FIGURA 3



A

Grafica Esfuerzo Cortante (τ) - Deformación Tangencial (δ)



Grafica Esfuerzo Cortante (τ) - Esfuerzo Normal (σ)
RESULTADOS DE ENSAYES DE CORTE DIRECTO " IN SITU "

La cuestión existente en macizos rocosos cuya superficie de falla probable esta dada por un sistema de fracturas poco persistente, puede perderse con el tiempo también, por los factores antes mencionados.

En términos generales la resistencia al esfuerzo cortante esta en función de un ángulo de fricción máximo (pico) o mínimo (residual), o algún valor intermedio del mismo el cual dependerá del grado de desplazamiento previo que haya ocurrido en la discontinuidad mas una contribución (i) debido a las ondulaciones de gran escala que puedan existir.

$$T = \sigma'n \tan (\Phi+i)$$

donde:

- τ = resistencia al corte (pico o residual)
- Φ = ángulo de fricción (pico o residual)
- $\sigma'n$ = esfuerzo normal efectivo
- i = pendiente promedio de las ondulaciones existentes

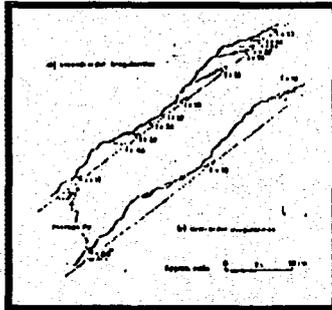
La figura 4a, muestra una superficie con irregularidades de primer y segundo orden. En la figura 4b y 4c, se observa el efecto del ángulo i en la resistencia y el efecto de dilatación y corte provocados por las irregularidades para diferentes niveles de esfuerzo normal aplicado.

Para evaluar la resistencia al corte en discontinuidades sin relleno, conviene utilizar la ecuación normalizada de resistencia al corte propuesta por Barton.

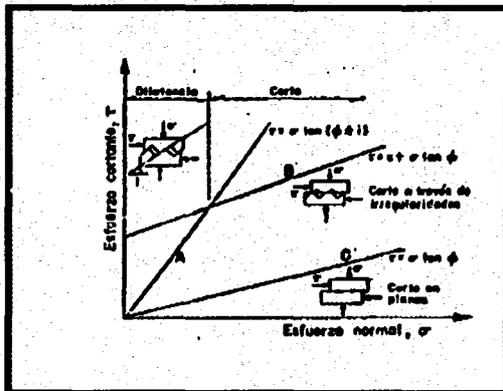
$$\tau/\sigma'n = \tan \Phi_p = \tan [JRC \text{ Log } 10 (JCS / \sigma'N + \Phi_r)]$$

Donde:

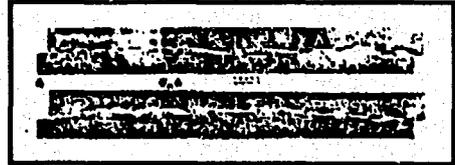
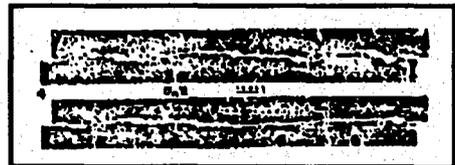
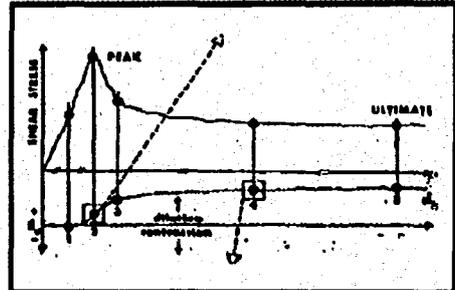
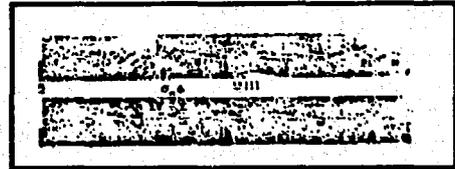
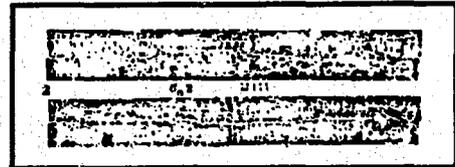
- τ = resistencia al esfuerzo cortante
- $\sigma'n$ = esfuerzo normal efectivo actuando en el plano de deslizamiento
- JRC = coeficiente de rugosidad de la fisura
- JCS = resistencia a la compresión simple del material que constituye las paredes de la fractura
- Φ_p = ángulo de fricción máximo entre las paredes de la fractura
- Φ_r = ángulo de fricción residual



A. Características de las irregularidades de primero y segundo orden en una fractura.



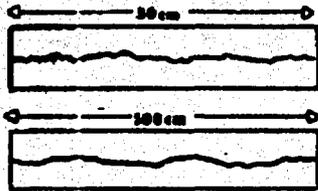
B. Efecto del ángulo ϕ y la resistencia al corte del material intacto



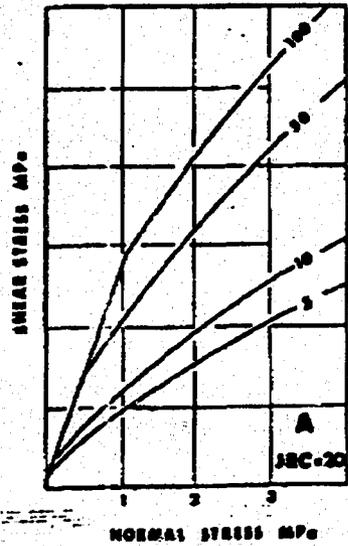
C. Evolución de esfuerzos al corte y deformación en una junta sin relleno.

Figura 4 Influencia de las irregularidades de las discontinuidades en la resistencia al corte

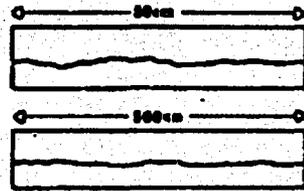
A. ROUGH UNDULATING - rough joints, rough shearing, rough bedding.



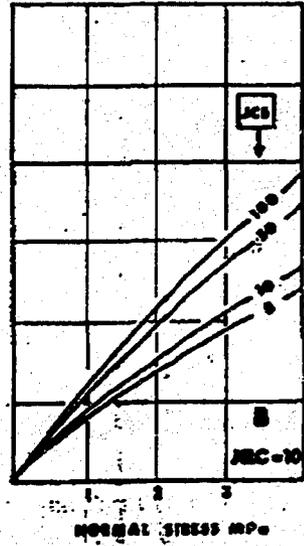
$$\tau/\sigma_n = \tan(20 \cdot \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + 30^\circ) \quad (A)$$



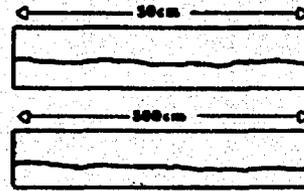
B. SMOOTH UNDULATING - smooth shearing, non-planar foliation and bedding.



$$\tau/\sigma_n = \tan(10 \cdot \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + 30^\circ) \quad (B)$$



C. SMOOTH NEARLY PLANAR - planar shear joints, planar foliation, bedding.



$$\tau/\sigma_n = \tan(5 \cdot \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + 30^\circ) \quad (C)$$

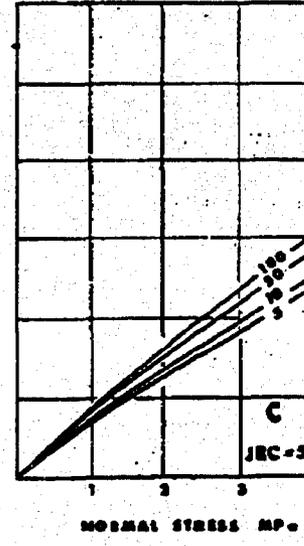


FIGURA 6.- EJEMPLOS DE ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA MÁXIMA AL CORTE PARA DIFERENTES PERFILES DE RUGOSIDAD.

La figura 6 ejemplifica la influencia de los coeficientes de rugosidad y resistencia en las envolventes de falla.

El valor de JCS dependerá del grado de alteración de las paredes de la fractura, de tal forma que pueden considerarse los siguientes dos casos:

- ❖ paredes sin alteración $JCS = \sigma_c$ siendo σ_c la resistencia a compresión simple de la pared inalterada

- ❖ paredes alteradas $JCS = \sigma_c / 4$

El valor de $\sigma_c / 4$ sólo debe usarse cuando no se mida directamente la resistencia a compresión simple de la roca alterada.

El conjunto $[JRC \log_{10} (JCS/\sigma'_n)]$ representa a la contribución de las irregularidades en la resistencia por fricción. A bajos niveles de esfuerzo normal, este conjunto tome al valor del ángulo máximo de dilatación, y es equivalente al ángulo de las irregularidades de primer orden respecto al ángulo promedio del echado. El efecto de este ángulo i , puede observarse claramente en las curvas que se muestran en la figura 4b.

E) METODOS DE ESTABILIZACION

Los métodos mas comúnmente utilizados para evitar la falla de taludes son los siguientes:

Drenaje

- ❖ Cunetas
- ❖ Lavaderos
- ❖ Bajantes
- ❖ Contra cunetas
- ❖ Alcantarillas
- ❖ Subdrenes
- ❖ Galerías filtrantes
- ❖ Barrenos perforados en la cara del talud o en el interior de la galería filtrante
- ❖ Bombeo

Anclaje

- ❖ Anclas de fricción

-
- ❖ Anclas de tensión
 - ❖ Anclas y retícula de traves metálicas o de concreto armado

Estructuras de contención

- ❖ Muros de concreto
- ❖ Muros de mampostería
- ❖ Gaviones
- ❖ Tierra armada
- ❖ Muros tipo milán
- ❖ Muros berlín
- ❖ Bermas en la base del talud.
- ❖ Contrafuertes

Movimiento de materiales

- ❖ Remoción del material en la zona inestable

Recubrimiento de taludes

- ❖ Malla metálica
- ❖ Mortero lanzado
- ❖ Concreto lanzado
- ❖ Cobertura vegetal

Perfilamiento de taludes

- ❖ Uso de voladuras de precorte
- ❖ Voladuras controladas con baja carga por tiempo

Reposición de roca y sello de grietas

- ❖ Reposición de zonas erosionadas al pie de bloques inestables con posibilidades de desprendimiento, y sello de grietas abiertas para evitar acceso del agua

Estos métodos son básicamente preventivos y se utilizan para proteger la cara del talud contra la erosión, dar apoyo a bloques y disminuir las fuerzas motoras actuantes y aumentar las fuerzas resistentes.

Si el factor de seguridad obtenido en el análisis de estabilidad resulta ser menor a la unidad, deben incluirse cualquiera de estos métodos en el cálculo en forma independiente o conjunta y evaluar cual combinación resulta más eficaz y más económica.

F) INSTRUMENTACION

En muchos casos resulta absolutamente indispensable controlar la evolución de la estabilidad del talud para que en caso de ser necesario puedan tomarse decisiones preventivas o correctivas a tiempo, utilizando cualquiera de los métodos de estabilización previamente mencionados. Cualquier sistema de control de taludes debe considerar fundamentalmente, la medición de deformaciones con el tiempo y la medición de las variaciones del nivel freático.

Medición de deformaciones

El objeto de observar la evolución de las deformaciones con el tiempo, radica en que todo proceso de inestabilidad se ve precedido de una aceleración gradual de las deformaciones en función del tiempo.

Estas deformaciones progresivas causan un fuerte abatimiento de la resistencia al corte en la superficie de falla.

Para realizar las medidas de deformaciones se puede recurrir a las medidas topográficas a distancia y a la utilización de extensómetros e inclinómetros así como a mojoneras de cemento o yeso.

Los sistemas topográficos convencionales utilizan puntos de referencia fijos colocados en diferentes puntos del talud y referidos a un punto fijo fuera de la zona de deslizamiento. Periódicamente se miden las coordenadas de cada punto con aparatos topográficos de alta precisión situados a distancia y fuera de la zona inestable y por medio de triangulaciones se obtienen las componentes del movimiento.

Actualmente se utilizan aparatos electrónicos para medir distancias, que funcionan por reflexión de un haz de rayos láser o infrarrojos que se refleja en el punto a medir, regresando al aparato que automáticamente calcula la distancia entre el aparato y el punto fijo de medición.

La medición directa de deformaciones puede hacerse en la superficie o en el interior del macizo rocoso mediante extensómetros o inclinómetros.

Los extensómetros miden deformaciones longitudinales entre dos puntos de referencia y pueden colocarse sobre la superficie o al interior de barrenos o de excavaciones. Un punto fijo debe colocarse fuera de el bloque inestable y otro sobre o dentro del mismo. Por lo que estos aparatos normalmente son utilizados cuando ya se han determinado las fronteras de la masa de roca inestable.

La medición de deformaciones puede hacerse mecánicamente o electrónicamente y precisiones hasta de 0.01 mm pueden alcanzarse.

Los inclinómetros son aparatos que se utilizan en perforaciones verticales y miden deformaciones transversales a lo largo de todo el barreno. El fondo de la perforación debe quedar por abajo de la superficie de falla supuesta con el propósito de que la masa de roca no movilizadada por la falla sirva de referencia fija, el equipo consta de una sonda o torpedo que tiene en el exterior una guía y en el interior un péndulo con contrapeso que funciona como un reóstato contra una resistencia fija. Este torpedo se baja a diferentes profundidades en el interior de una camisa metálica o tubo guía de aluminio o de plástico. La señal eléctrica llega a un receptor digital y a cada lectura obtenida en este receptor corresponde una cierta deformación lineal. La relación entre la lectura del receptor y la deformación lineal es previamente obtenida mediante la calibración del equipo. La precisión obtenida por los equipos convencionales es del orden de 0.1 mm.

Los testigos o mojoneras son de yeso o de cemento y se colocan en grietas o fracturas que puedan delimitar bloques inestables locales o de grandes dimensiones. Al desplazar una de las caras de la fractura el testigo se fractura por tensión o corte. La dirección del movimiento puede medirse si previamente se coloca una marca de referencia orientada, la magnitud se conoce por medición directa dando un valor aproximado.

Medición piezométrica

La presión de agua es el principal factor de inestabilidad en los taludes, por ello resulta totalmente imprescindible controlarla a lo largo de la vida de un talud, si se quiere garantizar un factor de seguridad adecuado.

El control de los niveles de agua presentes en el sitio se puede efectuar mediante barrenos abiertos (regularmente se utilizan los barrenos previamente ejecutados para exploración) en los cuales se introduce una sonda eléctrica que al contacto con el nivel de agua envía una señal al exterior.

En el piezómetro electro-neumático múltiple se miden directamente las presiones actuantes en un punto dado.

El principio de funcionamiento de este piezómetro es simple y consiste en aislar el punto de medición mediante empaques o tapones de cemento (según se desee) en cada punto de medición se coloca un sensor que contiene dos cámaras separadas por una lamina de acero inoxidable muy delgada. Una de las cámaras está en contacto con el agua proveniente de la roca la presión del agua provoca una deformación a la membrana, la cual en su parte posterior (situada en la otra cámara) tiene un borne eléctrico que hace contacto con otro muy próximo, cerrando un circuito que provoca que se encienda un foco en la superficie, posteriormente se aplica una presión de aire en la otra cámara hasta lograr que la membrana se recupere y se abra el circuito, en este momento, se llega a la presión de equilibrio y se conoce la presión del agua en este punto.

La medición de niveles y presiones debe hacerse periódicamente para conocer la fluctuación de ambos en diferentes épocas del año, logrando conocer que tan sensible es el nivel freático a las precipitaciones pluviales, a los cambios de nivel de los ríos, embalse, etc.

G) PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

El procedimiento constructivo también tiene un importante impacto en la estabilidad del talud, por lo que debe diseñarse de tal forma que las excavaciones se realicen gradualmente para evitar una descompresión instantánea del talud, que produzca deformaciones iniciales excesivas con la consecuente apertura de las fracturas existentes y pérdida de resistencia al corte en la potencial superficie de falla del talud.

En el caso de uso de explosivos, debe usarse la técnica de precorte con bajas cargas por tiempo, para generar una zona discontinua a lo largo de la cara del talud que evite la completa transmisión de la vibración generada por los explosivos durante los barqueos. Las bajas cargas por tiempo reducen daños al macizo rocoso, evitando la apertura de las fracturas existentes y la creación de nuevas fisuras en la roca intacta remanente.

Es conveniente que en esta etapa, si la obra lo justifica, el talud se encuentre previamente instrumentado para controlar el comportamiento del talud y si se observan deformaciones crecientes, proceder a colocar el soporte necesario hasta restablecer las condiciones de equilibrio del mismo.

CAPITULO II

INSTRUMENTACION

DETALLES EN ROCA

II INSTRUMENTACIÓN DE TALUDES EN ROCA

Un buen proyecto de ingeniería será entonces el mas económico sin menoscabo de la seguridad, por lo que se requiere de métodos y soluciones adecuadas durante el diseño y la posibilidad de cambio y mejora de esa solución conforme avanza la construcción de las obras.

La instrumentación es la técnica que proporciona al ingeniero información cualitativa y cuantitativa para permitirle adecuar y balancear los diseños geotécnicos de manera racional, obteniendo tanto seguridad como eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el simple hecho de instrumentar no garantiza que los diseños sean buenos o las obras seguras, incluso puede darse el caso de que instrumentos inadecuados o instalados en sitios equivocados, proporcionen información no útil o confusa, por lo que se requiere determinar con claridad y visión los objetivos de todo proyecto de instrumentación por simple que parezca.

La instrumentación se diseña con base en la practica actual de la especialidad, teniendo en cuenta las características geológicas, topográficas y geométricas del sitio ó proyecto, así como también el comportamiento esperado del talud, por lo que no es posible estandarizar la instrumentación que se instale en un caso dado.

Por otro lado, en un buen diseño de instrumentación no se tendrán instrumentos en exceso, lo que representa un desperdicio de recursos económicos, por lo que la regla básica para diseñar con éxito la instrumentación de una obra es que:

“Todo instrumento debe ser seleccionado e instalado para responder a una incógnita específica”.

A) DEFINICION Y OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Las personas no familiarizadas con instrumentación pueden creer que, para obtener la información requerida solo se necesita tomar un instrumento del almacén, instalarlo y tomar lecturas; sin embargo, el éxito de un proyecto de instrumentación depende de un considerable trabajo de ingeniería y planeación, así como la participación de personal capacitado en todas las etapas del proceso.

Definición:

- ❖ ***La instrumentación es una combinación de filosofía, conocimientos y actividades prácticas, que requiere de perspicacia, experiencia aparatos y técnicas de medición. para obtener información cualitativa o cuantitativa necesaria para evaluar y resolver un problema geotécnico.***

La instrumentación es toda una especialidad dentro de la geotecnia y se requiere de tiempo además de conocimientos y practica para dominar todos los detalles involucrados en un proyecto.

Para el caso específico de taludes, los objetivos generales de la instrumentación son:

- ❖ Conocer el comportamiento de los taludes bajo condiciones de carga normales o extraordinarias (como los sismos) con el fin de evaluar su seguridad.
- ❖ Detectar oportunamente cambios o deficiencias en la estabilidad de taludes naturales o, en el caso de los creados por el hombre, durante su construcción y operación posterior, para corregirlas oportunamente.
- ❖ Obtener conocimientos que permitan mejorar el "estado del arte" en diseño y construcción geotécnica, reduciendo costos sin demérito de la seguridad de los taludes que se construyan en el futuro.

B) VARIABLES QUE PUEDEN SER MEDIDAS

En general, las variables que pueden ser medidas en geotecnia son:

- ❖ Niveles y presiones de agua
- ❖ Presión de poro
- ❖ Fuerzas (cargas)
- ❖ Presiones totales dentro de la masa de suelo o roca
- ❖ Asentamiento o hundimiento de la superficie
- ❖ Desplazamientos
- ❖ Giros
- ❖ Deformaciones
- ❖ Desplomes
- ❖ Temperatura
- ❖ Vibraciones
- ❖ Caudales de agua
- ❖ Abertura o cierre de grietas o juntas

Usualmente se utiliza un tipo de instrumento para la medición de cada variable, aunque existen algunas excepciones. Para el caso de taludes en roca las mediciones más comunes son: niveles o presiones de agua, desplazamientos lineales o angulares, movimiento de grietas, fuerzas, y vibraciones.

La medición de estas variables está dirigida a conocer con exactitud factores que afectan la estabilidad de taludes, ya que los cambios de posición y de dimensión

están relacionadas con aspectos principales del comportamiento; desarrollo de grietas; cambios en los esfuerzos cortantes; en los empujes hidrostáticos, subpresiones o en otras fuerzas estáticas o dinámicas que actúan sobre el talud. Por lo que un diseño de instrumentación adecuado permite la observación periódica del comportamiento de las obras para detectar oportunamente anomalías y para evaluar su seguridad.

C) TIPOS DE INSTRUMENTOS Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En una instrumentación se deberá de consultar catálogos y manuales de los fabricantes, para conocer los detalles y características de un determinado aparato antes de decidir su utilización en un proyecto dado.

1.- Características de un buen instrumento

Debe considerarse que la característica principal que debe tener un instrumento sobre cualquier otra es la **CONFIABILIDAD**, es decir, que se deben utilizar instrumentos que proporcionen información verídica y confiable.

Inherentes a la confiabilidad están las siguientes características;

- ❖ Máxima simplicidad
- ❖ Repetibilidad
- ❖ Exactitud y estabilidad en las lecturas
- ❖ Durabilidad

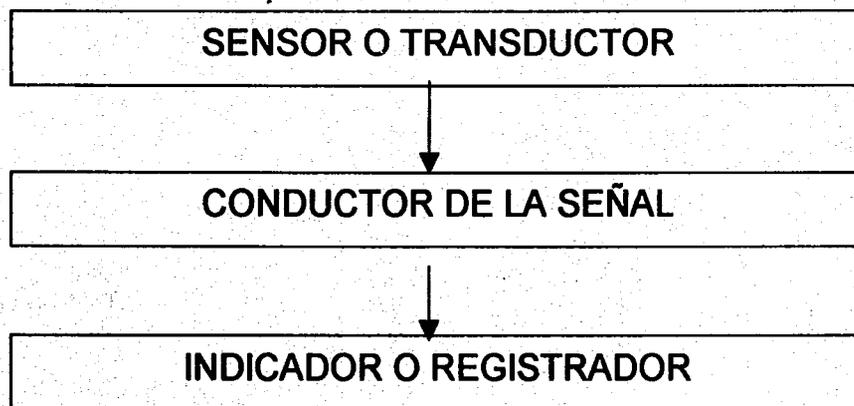
Otras características que debe cubrir un buen instrumento son las siguientes:

- ❖ Buena resolución y facilidad de lectura
- ❖ Mínima interferencia con el entorno
- ❖ Robustez para el manejo en obra
- ❖ Resistencia al medio ambiente hostil
- ❖ Facilidad para calibrar y verificar su funcionamiento
- ❖ Facilidad de instalación
- ❖ Poco sensible a efectos del tiempo

2.- Transductores

Cualquier instrumento por simple o complejo que sea está integrado por tres componentes básicos conocidos en serie: el sensor o transductor, el conductor de la señal y el indicador o registrador.

El sensor capta el cambio de la variable medida y a través de un transductor se genera una señal que es conducida hasta un dispositivo que permite leerla o registrarla.



a) Transductores ópticos

Consisten en lentes y prismas que permiten amplificar o transformar una imagen o rayo luminoso. En este tipo de transductores se agrupan los lentes utilizados en instrumentos topográficos y en otros aparatos, como los tránsitos, colimadores, etc.

b) Transductores Mecánicos

Los más comúnmente utilizados en instrumentación geotécnica son los indicadores de cuadrante y los micrómetros. Aunque los indicadores de cuadrante son más comunes, ambos pueden ser utilizados en dispositivos para medir movimientos de grietas o juntas, convergencias, desplazamientos, celdas de carga mecánicas, clinómetros mecánicos, extensómetros de rocas, etc.

Los indicadores de cuadrante se utilizan para convertir el movimiento lineal de un émbolo de resorte cargado, en el movimiento más grande y visible de una manecilla que gira arriba de una carátula. Las partes mecánicas incluyen engranes, cremalleras y transmisión (fig. 1).

Los micrómetros generalmente están compuestos por un tornillo de cuerda muy fina (micrométrico) que causa el desplazamiento de un émbolo dentro o fuera del cuerpo del instrumento. Este desplazamiento puede ser medido mediante una escala en el cuerpo que indica el número de vueltas de tornillo y las fracciones de vuelta se determinan con un vernier y otra escala. Los vernier pueden ser difíciles de leer y ahora algunos micrómetros están equipados con contadores digitales que facilitan la medición y en general son más robustos que los indicadores de cuadrante (fig. 2).

c) Transductores Hidráulicos

Los más utilizados en instrumentación geotécnica son los manómetros y los dispositivos de presión de tubo de Bourdón, también conocido como manómetro de tubo de Bourdón.

El manómetro está formado por un tubo transparente en forma de U lleno de algún fluido, usualmente mercurio. La presión de un lado del tubo en U es balanceada por una presión igual en el otro lado, pudiendo medirla calculando la diferencia de alturas del fluido (fig. 3).

El manómetro de tubo de Bourdón consiste en un tubo metálico (bronce o acero) ligeramente aplanado y con forma de C, que cuando es presurizado internamente trata de enderezarse.

El movimiento resultante del tubo en C se transmite por medio de un mecanismo a una manecilla, la cual gira sobre una carátula circular donde se toma la lectura (fig. 4).

d) Transductores Neumáticos

Generalmente se utilizan en instrumentos para medición de presiones y pueden ser de dos tipos: normalmente cerrados o normalmente abiertos (fig 5).

Actualmente los que son más utilizados son del tipo normalmente cerrado, donde el transductor está compuesto por un cuerpo, una membrana y dos o tres tubos. La presión se transmite inyectando un gas o fluido por una manguera hasta el cuerpo del transductor, para actuar sobre una membrana flexible. Al vencer la presión externa que actúa sobre la membrana, el gas o fluido a presión circula por el cuerpo del transductor hasta otra manguera de retorno y se detecta su salida. Cuando esto sucede, se deja de inyectar el gas o fluido y la membrana regresa a su posición inicial pudiendo leer la presión de apertura en un dispositivo de presión, ya sea manómetro, manómetro de tubo de Bourdón, o un transductor de tipo eléctrico.

El transductor normalmente abierto también se conoce como de válvula "check" y permanece abierto hasta que se excede la presión externa, en ese momento la válvula se cierra y el gas a presión es atrapado en el tubo de salida, pudiendo leer el valor de la presión de la misma manera que en el otro tipo de transductor. Se ha discontinuado el uso de este tipo de transductor por los problemas de funcionamiento de la válvula cuando se atrapa agua en el sistema o se degradan los componentes falseando las lecturas.

e) **Transductores Eléctricos**

Este tipo de transductores se utilizan actualmente en gran número de instrumentos y pueden ser de los siguientes tipos: Resistencia, inductancia, cuerda vibrante, nivel electrolítico, y magnético, por citar los principales (figs. 6 a 8).

Los transductores de resistencia se basan en la propiedad básica de que la resistencia eléctrica de un conductor cambia en razón directa a su longitud. La relación entre el cambio en la resistencia y el cambio en la longitud está dada por el factor del dispositivo (GF), donde:

Los tipos más comunes de transductores de resistencia son los potenciómetros y los "Strain Gages". Los potenciómetros son dispositivos que cuentan con un cursor móvil que puede hacer contacto a lo largo de una resistencia fija, obteniendo una resistencia

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} GF$$

variable entre el contacto móvil y uno de los extremos de la resistencia fija. Los Strain Gages básicamente son resistencias planas de cinco tipos: Alambre pegado, alambre despegado, hoja metálica pegada, semiconductor, y soldable.

La salida de una resistencia eléctrica de Strain Gages normalmente es medida con un circuito llamado puente de Wheatstone. El circuito tiene cuatro "ramas" formadas por las resistencias R1, R2, R3 y R4, donde las dos primeras son conocidas, la tercera desconocida y R4 variable. Se aplica un voltaje al circuito y se altera el valor de la resistencia R4 hasta que el puente se equilibra, en ese momento se mide el valor de R3 ya que se cumple la relación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Otro transductor eléctrico muy usado es el "Transformador Diferencial Lineal Variable" (LVDT) consiste en un núcleo magnético móvil que pasa a través de dos bobinas, una primaria y otra secundaria. Un voltaje de entrada (de excitación) se aplica a la bobina primaria induciendo un voltaje en la secundaria, con una magnitud que depende de la posición del núcleo. La salida neta del LVDT es la diferencia entre el voltaje de entrada y el de salida.

Para evitar los efectos de degradación de la señal de salida por la longitud en los cables de los LVDT, se diseñaron circuitos miniaturizados que acondicionan y amplifican la señal. A este nuevo dispositivo se le llama DCDT "Transformador Diferencial de Corriente Directa".

Una alternativa a los LVDT y DCDT es el potenciómetro, que consiste en un cursor que hace contacto con una tira de resistencia. Al aplicar un voltaje, la suma de los voltajes medidos entre cada punta de la resistencia y el cursor debe ser igual al voltaje de entrada y se mide uno de ellos como señal de salida del transductor.

Otro tipo de transductor eléctrico muy común es de cuerda vibrante. Consiste en un dispositivo en el cual un alambre de acero de longitud conocida, tensado y fijo en sus extremos a dos mordazas, por lo que es libre de vibrar a su frecuencia natural, como una cuerda de piano. La frecuencia de vibración cambia con la tensión del alambre y por lo tanto con ligeros movimientos de las dos mordazas de los extremos. El alambre es excitado por una bobina eléctrica fija cerca del punto medio del alambre y con la misma u otra bobina se mide la frecuencia de vibración. La ecuación para determinar la frecuencia de vibración de una cuerda vibrante en términos de esfuerzo es:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E g \epsilon}{\rho}}$$

En términos de la deformación:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma g}{\rho}}$$

Donde:

f = frecuencia natural (sec-1)

L = Longitud de la cuerda vibrante

E = módulo de elasticidad del alambre por unidad de longitud

g = aceleración de la gravedad

s = esfuerzo en la cuerda vibrante

g = deformación en la cuerda vibrante

r = densidad del material de la cuerda vibrante

despejando la deformación:

$$\epsilon = \frac{4L^2 f^2 \rho}{E g} = K f^2$$

pero como el transductor se instala con una tensión inicial, tanto la frecuencia inicial como la actual intervienen en la relación, quedando:

$$\epsilon = K (f^2 - f_0^2)$$

Por otro lado, los transductores de nivel electrolítico consisten en una ampollita de vidrio sellada similar a las ampollitas de las burbujas de los instrumentos topográficos, pero parcialmente llena de un líquido conductor (electrolito). Se mide la resistencia entre los puntos extremos y el centro de la ampollita y se comparan entre sí. La magnitud de la diferencia depende y es directamente proporcional a la inclinación de la ampollita.

El último transductor eléctrico que se comenta es el acelerómetro de balanza de fuerza, que consiste en una masa suspendida en el campo magnético de un detector de posición. Cuando la masa es sujeta a la fuerza de la gravedad a lo largo de su eje sensible, trata de moverse y esto causa un cambio de corriente en el detector. Este cambio es retroalimentado a una bobina por medio de un servo-amplificador, impartiendo una fuerza electromagnética a la masa igual pero en sentido opuesto a la fuerza inicial de gravedad. Por lo que el resultado es que la masa no se mueve y la corriente que se aplica a la bobina se mide mediante el voltaje a través de una resistencia de precisión. Este voltaje es directamente proporcional a la fuerza inicial.

En los últimos años los transductores eléctricos han sido mejorados y permiten la transmisión de la señal a relativamente grandes distancias, dando paso a la automatización de la instrumentación.

Por otro lado, no todos los tipos de transductores son aplicables para medir todas las variables, es decir que en algunos casos podrá utilizarse un solo tipo de transductor y en otros, solo se podrá escoger entre dos o tres tipos.

3.- Elementos de conducción de la señal

Los elementos conductores de la señal dependen obviamente del tipo de transductor utilizado y pueden ser cables para los eléctricos; mangueras o tuberías para los hidráulicos y neumáticos; barras o alambres para los mecánicos; imágenes, rayos luminosos o láser para los ópticos; sonido o señales de radio para los acústicos: etc.

4.- Indicadores o registradores

Los indicadores simplemente muestran el valor de la variable medida y se requiere que una persona tome la lectura, como por ejemplo en una cinta métrica, escala, carátula, vernier, etc.; mientras que los registradores son dispositivos de lectura que permiten guardar los valores en cintas magnéticas, de papel, memorias de estado sólido u otros medios, de manera que se pueda realizar la toma de lecturas periódicamente. en ocasiones con intervalos muy cortos (p. ej. aceleraciones sísmicas), facilitando su proceso y análisis posterior. Los registradores se han automatizado en los últimos años (Data Loggers) y son capaces de almacenar miles de datos de varios instrumentos a la vez.

5.- Instrumentos para medir niveles y presiones de agua

Los instrumentos que se utilizan para medir niveles y presiones de agua se denominan piezómetros. Las aplicaciones de los piezómetros caen en dos categorías generales: Para conocer el patrón de flujo de agua dentro de la masa de roca; y para proporcionar un índice de la estabilidad de un macizo rocoso (subpresiones, empujes), por lo que la medición del nivel o presión del agua es un aspecto de gran importancia en Estabilidad de Taludes.

Los piezómetros pueden agruparse en los que tienen un diafragma entre el transductor y el agua, y en los que no lo tienen. Los instrumentos del primer grupo tienen transductores neumáticos o eléctricos, éstos generalmente del tipo cuerda vibrante, de resistencia o de Strain Gages. Entre los aparatos del segundo grupo están los pozos de observación y los piezómetros abiertos (figs. 9 a 12).

a) Pozos de observación. Consiste en una sección de tubo ranurado llamado bulbo, unido a otras secciones de tubo que suben hasta la superficie, instalados en un barreno que se rellena con arena. En la superficie se construye un tapón generalmente con mortero de cemento para evitar que agua superficial entre al barreno y el nivel del agua se determina utilizando una sonda eléctrica. La sonda eléctrica consiste en una barra delgada de plomo unida en la punta de un cable dúplex acotado, que al entrar en contacto con el agua cierra un circuito eléctrico, lo que se detecta desde el exterior por medio de un amperímetro, un foco o un timbre, pudiendo medir la profundidad del agua en el tubo. Los pozos de observación pueden crear una conexión vertical indeseable entre estratos, drenando mantos colgados o conectando acuíferos a presión, por lo que las mediciones pudieran ser poco significativas.

b) Piezómetros abiertos. Un piezómetro abierto es igual que los pozos de observación, excepto que se forma una cámara piezométrica sellando el barreno a una cierta altura del bulbo. El sello debe ser efectivo para garantizar que el instrumento solo responda al nivel o presión del agua en la zona de la cámara piezométrica, esto se logra normalmente utilizando sellos de lechada de cemento-bentonita. El resto del barreno se rellena usualmente con la misma lechada. Aunque este tipo de piezómetro no resulta satisfactorio en rocas con coeficientes aparentes de permeabilidad muy bajos (escasamente fracturados o fracturas finas y cerradas); la simplicidad, robustez y confiabilidad del instrumento lo hacen el más utilizado de todos.

c) Piezómetros neumáticos. Estos piezómetros utilizan alguno de los transductores neumáticos descritos con anterioridad, añadiendo un filtro para separar el diafragma flexible de materiales finos del sitio donde será instalado el piezómetro. Debe tenerse cuidado en el diseño del filtro ya que uno de poro muy fino se colmatará rápidamente en rocas fracturadas con rellenos arcillosos y otro muy abierto no impedirá el paso de partículas bloqueando al diafragma e impidiéndole desplazarse. Los piezómetros neumáticos generalmente se instalan en barrenos.

d) Piezómetros de cuerda vibrante. Son aparatos que utilizan un transductores de cuerda vibrante en los que un extremo está sujeto a una membrana metálica. La presión del agua causa un cambio en la deflexión de la membrana, lo que provoca a su vez un cambio en la tensión de la cuerda que puede ser medido al medir su frecuencia de vibración. Algunas desventajas de este tipo de transductor son la corrosión del alambre y la deriva del cero, para lo cual algunos fabricantes han implementado efectivas medidas correctivas; sin embargo, este tipo de instrumentos son mejor adaptados para la obtención de datos confiables de gran precisión a corto plazo, que a largo plazo.

e) Piezómetros de resistencia eléctrica. Estos aparatos utilizan un transductor de resistencia, pegada o no, Strain Gage o tipo Carlson, ligado a un diafragma flexible. Su utilización implica verificaciones del cero y calibraciones periódicas, pero este tipo de piezómetros es el único capaz de medir las presiones de agua que varían con alta frecuencia dinámica, tal como ocurre en sismos o con las actividades de construcción y el uso de explosivos en sitios cercanos. Además, debe recordarse que todos los piezómetros de tipo eléctrico son preferibles cuando se requiere un sistema automatizado de medición, por lo que han tenido un importante desarrollo en los últimos años. Todos los piezómetros con transductor eléctrico pueden instalarse en un barreno.

6.- Instrumentos para medir deslizamientos

La medición de movimientos del terreno y en taludes, esté dirigida a conocer con precisión los desplazamientos horizontales, cambios de posición o de dimensión, y giros que pudieran dar lugar a inestabilidad, formación de grietas, concentraciones de esfuerzos y otros comportamientos indeseables. En general, los desplazamientos pueden medirse superficialmente por medio de aparatos, referencias y procedimientos topográficos, péndulos y clinómetros, e internamente mediante sondas que se introducen en tuberías especiales (inclinómetros). Para todas las mediciones de deformación es fundamental establecer una base fija de referencia fuera del área de influencia del talud, para poder conocer los movimientos absolutos.

a) Inclinómetros. Es uno de los aparatos más usados para medir desplazamientos, permite conocer los desplazamientos o deformaciones normales al eje de una tubería mediante el paso de una sonda por ella. La sonda contiene un transductor diseñado para medir la inclinación con respecto a la vertical y la tubería puede ser instalada en un barreno o en un relleno (fig. 13). También es posible hacer mediciones en tuberías horizontales o inclinadas, adaptando la posición de los transductores dentro de la sonda. La mayoría de los sistemas de inclinómetros tiene cuatro componentes principales:

- ❖ Una tubería de guía permanentemente instalada, hecha de aluminio, plástico, fibra de vidrio o acero, que tiene cuatro ranuras longitudinales alineadas en dos planos ortogonales que permiten guiar a la sonda.

Cuando se miden desplazamientos horizontales, la tubería se instala lo más vertical posible.

- ❖ Una sonda portátil que contiene al transductor. El transductor más usado es el acelerómetro de balanza de fuerza, pero también se encuentran de cuerda vibrante, de nivel electrolítico, de Strain Gages y de resistencia variable.
- ❖ Una unidad de lectura portátil para el suministro de energía y para realizar la medición.
- ❖ Un cable eléctrico graduado que liga la sonda con la unidad de lectura y permite bajar o subir la sonda dentro del ademe, controlando con precisión la posición de la sonda.

Después de que se instala la tubería se baja la sonda hasta el fondo y se hace una lectura de la inclinación. Después se sube la sonda a intervalos fijos, usualmente iguales, y se miden las inclinaciones en cada punto hasta llegar a la superficie. La integración de las inclinaciones de todos los puntos define la geometría de la tubería, las diferencias entre un sondeo y el inicial o base definen el cambio en la geometría de la tubería y, por consiguiente, los desplazamientos.

b) Péndulos. Los péndulos directos o invertidos se utilizan para medir desplazamientos horizontales donde se requiere gran exactitud. Los péndulos directos están formados por un alambre fijo en el extremo superior y ligado a un contrapeso en el inferior, y esté amortiguado en un tanque con aceite. El invertido está fijo en la parte inferior y ligado a un flotador en la superior para mantener el alambre en tensión constante (fig. 14). Las principales ventajas de los péndulos son su alta exactitud (hasta 0.01 mm), simplicidad y longevidad. Los péndulos invertidos permiten obtener deformaciones absolutas ya que generalmente están anclados en puntos fijos bajo la superficie del terreno, mientras que con los directos se tienen desplazamientos relativos. La medición se realiza al determinar la posición del alambre del péndulo mediante escalas graduadas, oculares montados en vernier deslizantes, coordenómetro, o aparatos automatizados a base de rayos de luz y celdas fotosensibles.

c) Clinómetros. Son instrumentos que permiten medir los cambios en la inclinación (rotación) de puntos sobre o en el terreno o una estructura. Los clinómetros pueden tener un transductor mecánico, eléctrico de cuerda vibrante, acelerómetro de balanza de fuerza o de nivel electrolítico y tienen en general muy buena sensibilidad (fig. 15).

d) Extensómetros de barra. Este tipo de instrumento es ampliamente utilizado en estabilidad de taludes debido a la extrema sencillez de su principio de funcionamiento, facilidad de instalación, toma de lecturas manual o automatizada a control remoto, y gran exactitud. El aparato puede ser de una o varias barras y consta de cuatro partes: un ancla, la barra con su funda, el cabezal y el dispositivo de medición. El instrumento se coloca dentro de un barreno el cual se rellena posteriormente con lechada quedando fija el ancla y libre la barra (gracias a su funda), luego se fija el cabezal en la superficie del terrero (fig. 16). La medición consiste en medir la distancia entre el cabezal y la (o las) barra(s), utilizando un calibrador de profundidades o un defleómetro. También es posible instalar transductores eléctricos en el cabezal para la medición automatizada del extensómetro.

e) Métodos topográficos. Otro procedimiento de gran importancia para medir desplazamientos tanto horizontales como verticales (asentamientos o hundimientos) y su velocidad en estabilidad de taludes y en general en geotecnia, son las técnicas topográficas; sin embargo, es fundamental establecer un sistema de control topográfico con bases y bancos de nivel adecuados construidos fuera del área de influencia del talud. En los métodos topográficos la exactitud está controlada por la calidad de las técnicas de medición, la propia exactitud de los aparatos y las características de las referencias o puntos medidos. Los instrumentos topográficos comprenden taquímetros, tránsitos, niveles ópticos, brújulas, distanciómetros, miras, plomadas, cintas, etc.

7.- Medidores de grietas

Para la medición de grietas y fisuras se utilizan los extensómetros de superficie, que son aparatos que permiten medir el cambio en la distancia entre dos puntos situados en la superficie del terreno. Los medidores de juntas o grietas se utilizan típicamente para seguir la evolución y comportamiento de fisuras, grietas y fracturas de tensión superficiales en un talud. Estas mediciones pueden proporcionar información concerniente al comportamiento en profundidad y son indicativas de la movilidad del talud.

Las grietas se pueden medir con escala graduada, calibrador, vernier, cinta de topógrafo, micrómetro y con defleómetros. También es posible utilizar extensómetros eléctricos a base de transductores de resistencia o de cuerda vibrante. Estos aparatos pueden dividirse en dos categorías: medidores de juntas grietas portátiles y medidores fijos.

Los extensómetros portátiles se emplean para medir manualmente los cambios de pequeña magnitud en las dimensiones de una grieta o fisura, para lo cual se colocan puntos de referencia permanentes en los extremos opuestos de la grieta que se va a medir y el extensómetro se acopla a dichos pernos en el momento de la lectura (fig. 17). En general los extensómetros portátiles tienen una gran exactitud (hasta 0.001 mm) pero intervalo de medición reducido (máximo del orden de 5 mm).

Los medidores fijos son extensómetros de barras telescópicas, de cinta o de alambre donde el sensor se coloca en la parte considerada fija del terreno y un ancla en la parte considerada móvil, en donde se fija el extremo de las barras, cinta o alambre (fig. 18). En este caso los aparatos permiten un intervalo de medición mayor aunque se reduce su exactitud. Los sensores pueden ser eléctricos y automatizar las mediciones, inclusive es factible instalar un sistema de alarmas para activarse en caso de que la abertura de la grieta instrumentada exceda un valor definido como crítico por el ingeniero responsable.

8.- Instrumentación sísmica.

Existen dos tipos de vibraciones de interés en ingeniería civil: vibraciones de origen natural y vibraciones causadas por el hombre. Las vibraciones de origen natural provienen de diversas fuentes: sismos, variaciones barométricas, mareas, vibraciones inducidas por las olas del mar, deslizamientos de roca y flujo de agua. Las vibraciones de origen artificial pueden tener muchas fuentes: funcionamiento de maquinaria, actividades de construcción, trabajos de demolición, uso de explosivos, excavaciones, tráfico de vehículos, etc.

En el diseño de una instrumentación para medir vibraciones se deben tener en cuenta los siguientes factores: El sistema debe ser capaz de registrar los movimientos del terreno; debe cubrir todo el rango de frecuencia de las vibraciones que se espera encontrar, y se debe tener un control preciso del tiempo. Los instrumentos más utilizados actualmente están los geófonos, sismógrafos y acelerógrafos.

Los geófonos se utilizan en prospecciones geofísicas (microsísmica) y en general para medir vibraciones producidas por el hombre. Consiste en un sensor construido con un cristal piezométrico montado en un cantiliver con una frecuencia natural de aproximadamente 1000 Hz. La señal del sensor se amplifica y alimenta al sistema de registro para obtener una gráfica tiempo-aceleración y una salida para detección acústica. Con este aparato es posible registrar aceleraciones hasta de 0.00033 g. aproximadamente.

Un sismógrafo es todo aparato que escribe un registro permanente y continuo de los movimientos del terreno. El registro (sismograma) se realiza con trazas sobre papel ahumado o con tinta en papel satinado. Los componentes básicos de un sismógrafo incluyen: Un marco de base; de uno a tres sensores, un reloj de

precisión; y el sistema de registro. Los sensores usuales son sistemas de masa-resorte-amortiguador, cuyas constantes físicas (periodo natural, rango, amplificación, amortiguamiento) son conocidas, para poder calibrar el aparato y calcular los movimientos del terreno a partir del sismograma. Estos instrumentos usualmente son portátiles y alimentados por baterías. Los sismógrafos se utilizan para registrar niveles de actividad sísmica desde muy baja (microsísmicidad) hasta moderadamente alta.

Los acelerógrafos se utilizan para medir niveles altos de actividad sísmica ("Strong Motion"), y registran la aceleración del terreno en varias componentes. Los sensores generalmente son del tipo balanza de fuerza y se utilizan tres colocados en arreglo ortogonal, donde uno es vertical. El sistema de registro puede ser en película fotográfica, cinta magnética o memoria de estado sólido. Los aparatos comunes permiten registrar movimientos sísmicos hasta de 1 g, donde g = aceleración de la gravedad, y normalmente son activados a 0.1 g. El sistema de control del tiempo puede ser un radio transmisor acoplado y sintonizado con una señal de tiempo universal (WWVB), o a un reloj electrónico de precisión interno que se ajusta cada vez que se da mantenimiento al instrumento. La fuente de alimentación consiste en baterías recargables conectadas en flotación con celdas solares. Además, el aparato debe contar con un sistema de disparo que activará el registro a un predeterminado nivel de movimiento de entrada, de manera que se tenga el instrumento completamente operacional y registrando en menos de 0.1 segundo. Aunque este un tiempo corto, se pierde el registro del inicio del sismo, por lo que en algunos aparatos modernos ya se ha incluido la opción de "memoria de preevento", que permite registrar el acelerograma completo desde el inicio. Usualmente los acelerógrafos permiten registrar tantos eventos como dure la película, cinta magnética o capacidad de la memoria del aparato.

D) PROCEDIMIENTO GENERAL DE INSTRUMENTACION GEOTECNICA

Todo proyecto de instrumentación, por sencillo que parezca, requiere seguir una metodología planeada y sistemática para obtener buenos resultados. Esta metodología esta expresada en el "Procedimiento General de Instrumentación Geotécnica" (PGIG), que contempla dos fases: planeación e implantación.

La planeación debe incluir los siguientes aspectos:

- ❖ Definir las condiciones geológicas del sitio y las características de la obra
- ❖ Anticipar los mecanismos que controlan el comportamiento
- ❖ Definir las incógnitas geotécnicas que deben responderse mediante la instrumentación
- ❖ Definir los objetivos de la instrumentación
- ❖ Seleccionar los parámetros que serán medidos
- ❖ Predecir las magnitudes máximas y mínimas de los cambios de las variables
- ❖ Prever acciones correctivas en caso de detectar anomalías

-
- ❖ Asignar tareas para todas las etapas del proyecto, desde el diseño hasta el análisis
 - ❖ Seleccionar los instrumentos
 - ❖ Seleccionar los sitios donde serán instalados los instrumentos
 - ❖ Planear el registro de factores que pudieran influir en los datos medidos
 - ❖ Listar el objetivo específico de cada instrumento
 - ❖ Escribir la memoria detallada del diseño de la instrumentación
 - ❖ Definir y obtener el presupuesto
 - ❖ Seleccionar el método de implantación (contratación)
 - ❖ Escribir las especificaciones para la adquisición de instrumentos y materiales
 - ❖ Escribir los procedimientos para la correcta instalación de los instrumentos
 - ❖ Programar y calendarizar la instalación en función del avance de la construcción
 - ❖ Planear la calibración y mantenimiento regular de los aparatos
 - ❖ Establecer los procedimientos para asegurar la correcta toma de lecturas
 - ❖ Planear la medición en función de la fase constructiva de la obra y de las anomalías que sean detectadas
 - ❖ Planear el proceso, presentación, análisis y reporte de los datos
 - ❖ Escribir las especificaciones para contratar los servicios de instrumentación de campo
 - ❖ Actualizar presupuestos y elaborar contratos

La fase de implantación incluye:

- ❖ Adquirir los instrumentos
- ❖ Instalar los instrumentos
- ❖ Calibrar y conservar en buen estado los aparatos
- ❖ Realizar la medición de acuerdo con el programa establecido
- ❖ Procesar y presentar los datos
- ❖ Analizar los datos
- ❖ Escribir los informes de análisis y las conclusiones de la interpretación de los datos

El primer paso para llevar a cabo exitosamente un proyecto de instrumentación es nombrar a un ingeniero jefe de instrumentación, con suficientes conocimientos y experiencia en trabajos de instrumentación para llevarlo a cabo. El Jefe de instrumentación será responsable de alcanzar los objetivos que se establezcan coordinando y regulando las actividades de todos los grupos de personas involucradas en cada etapa, normando criterios y asignando responsabilidades.

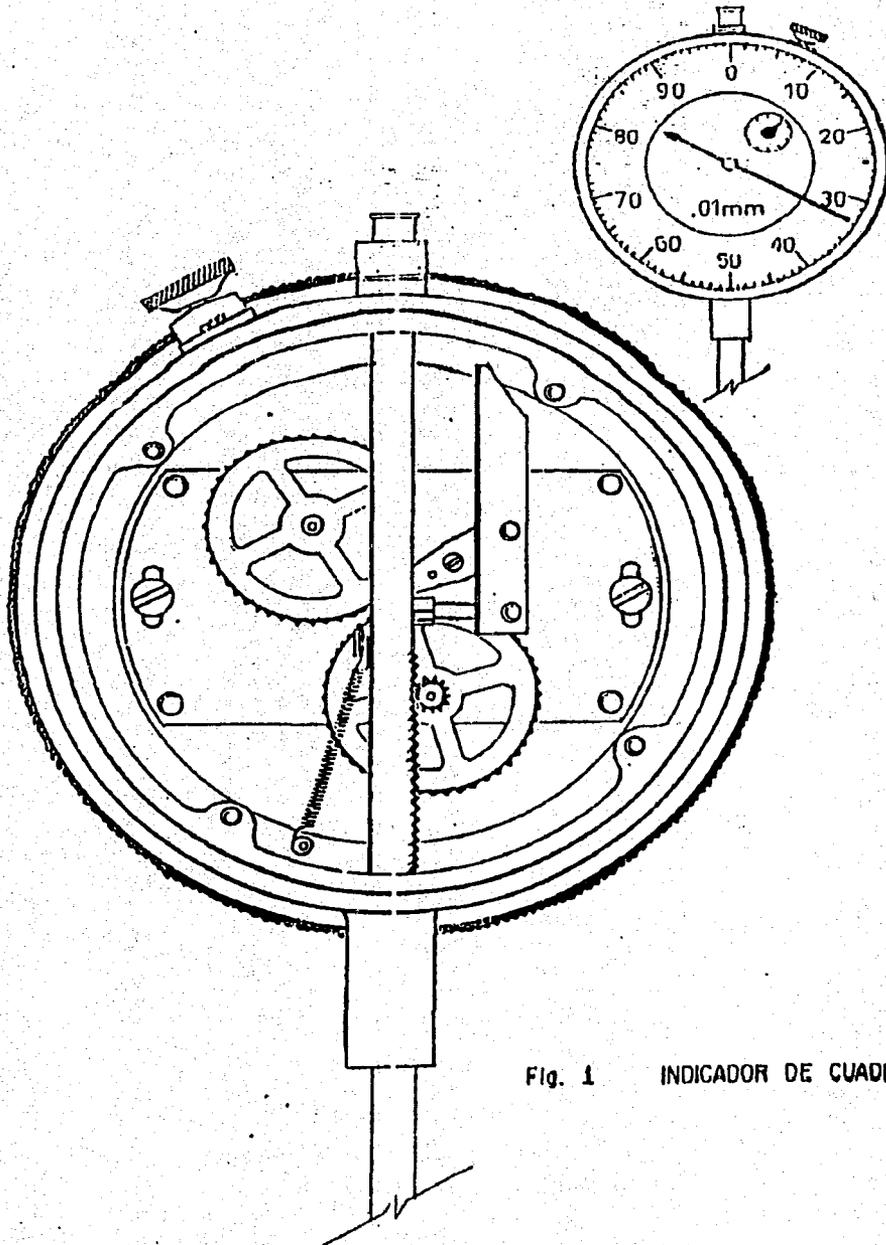


Fig. 1 INDICADOR DE CUADRANTE

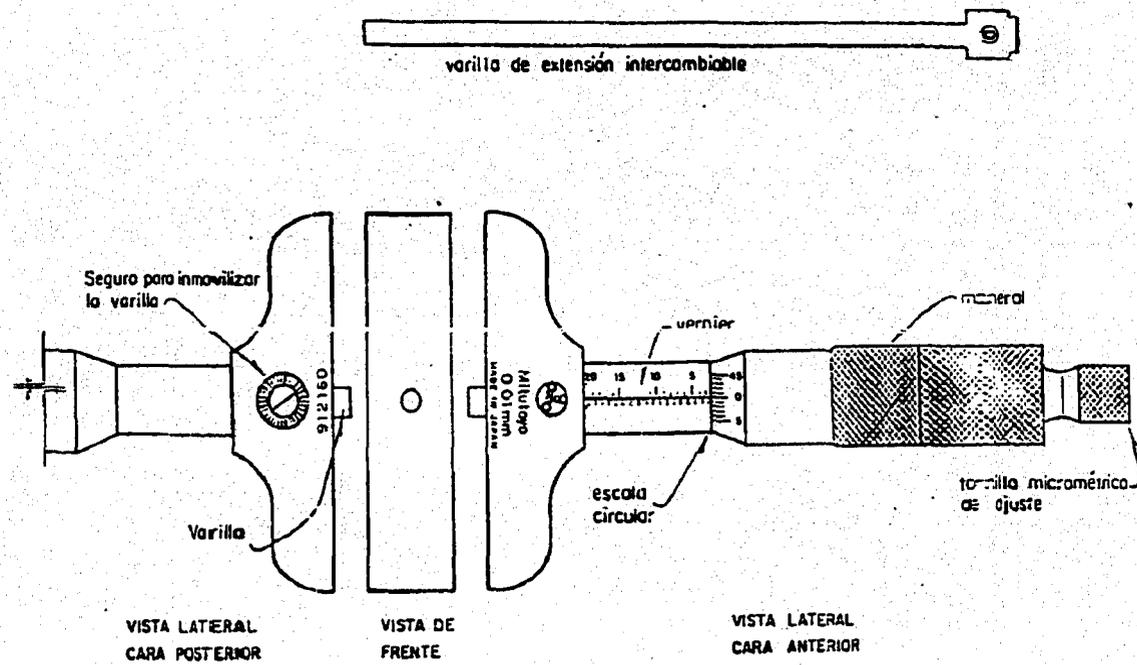
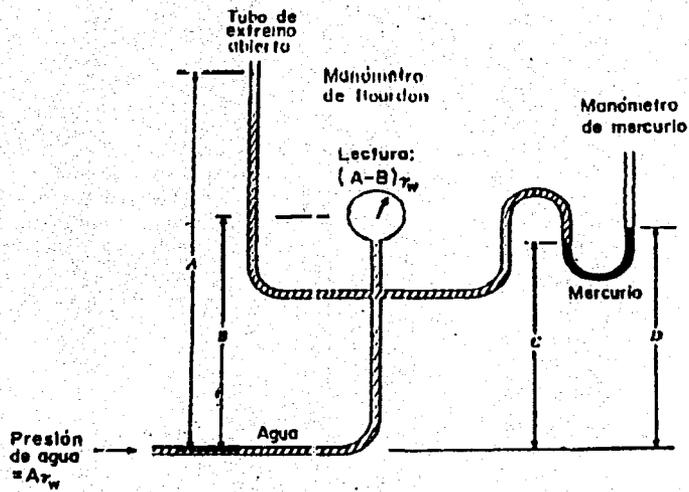


Fig. 2 MICROMETRO



γ_w = densidad del agua

γ_{Hg} = densidad del mercurio

- a) Usando el manómetro de Bourdon:
 presión del agua = lectura del manómetro + $U\gamma_w$
- b) Usando el manómetro de mercurio:
 presión del agua = $(D-C)\gamma_{Hg} + C\gamma_w$

Fig. 3 CRÓQUIS DE LOS TRANSDUCTORES HIDRAULICOS

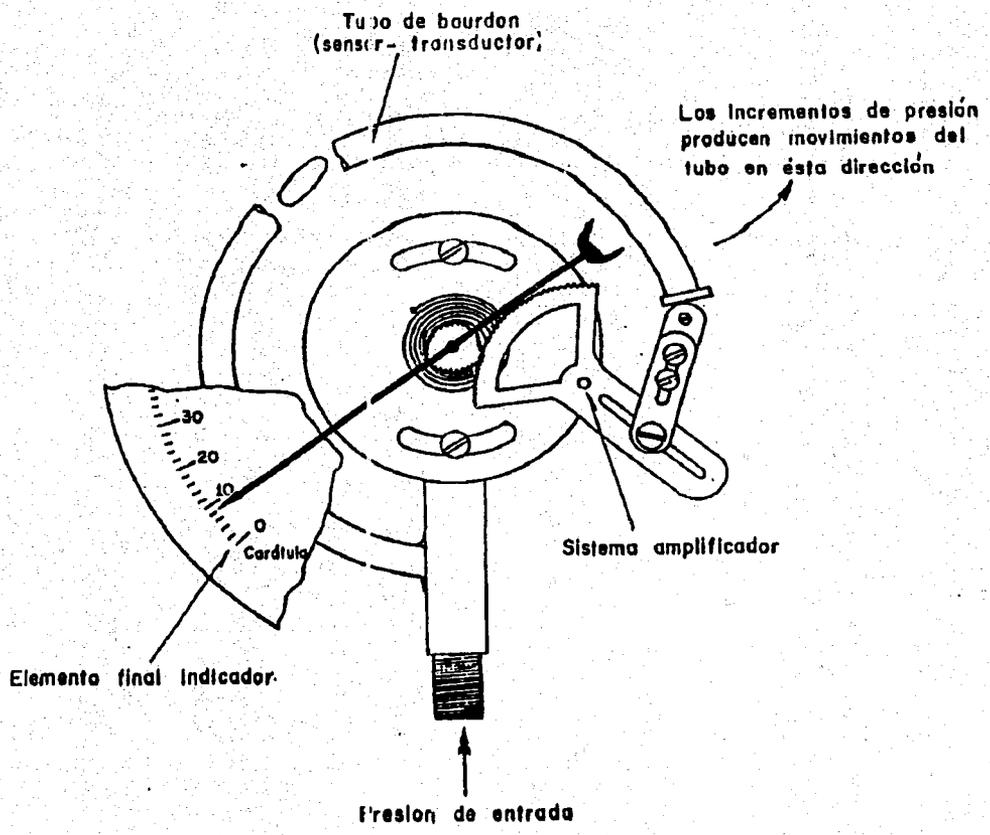
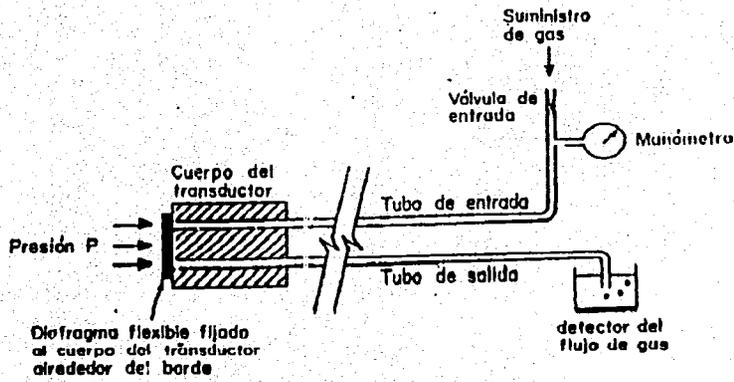
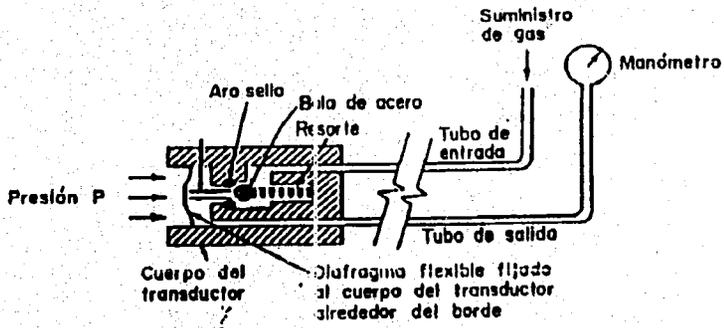


Fig.4 MANOMETRO DE TUBO DE BOURDON

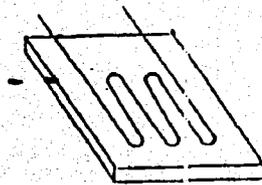


a) Transductor normalmente cerrado

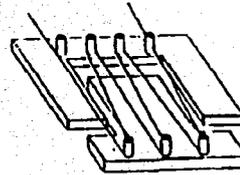


b) Transductor normalmente abierto

Fig. 5 CROQUIS DE LOS TRANSDUCTORES NEUMATICOS



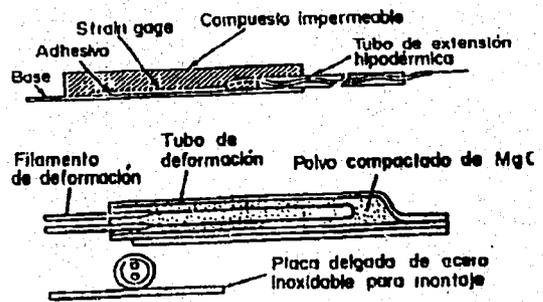
a) Strain gage de alambre pegado



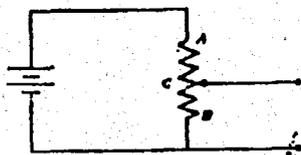
b) Strain gage de alambre despegado



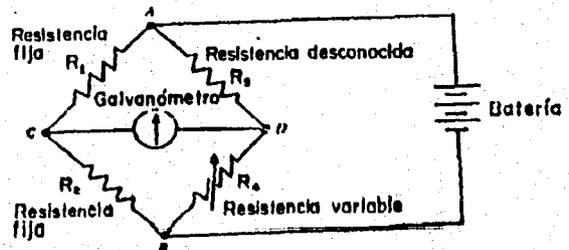
c) Strain gage de hoja metálica pegada



d) Strain gage soldables

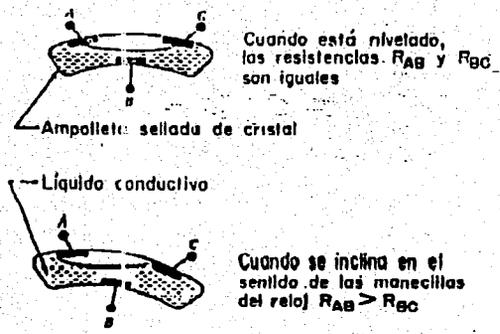


e) Potenciómetro lineal

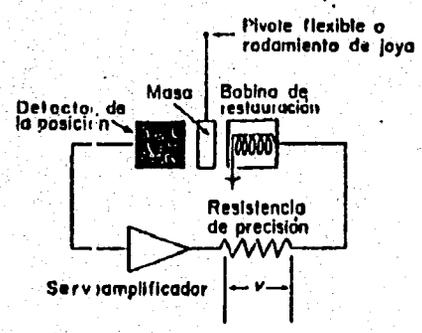


f) Circuito de puente de Wheatstone

Fig. 6 CROQUIS DE TRANSDUCTORES ELECTRICOS

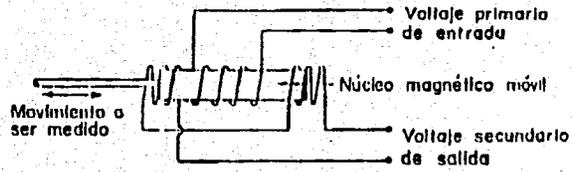


a) Croquis de un nivel electrofítico

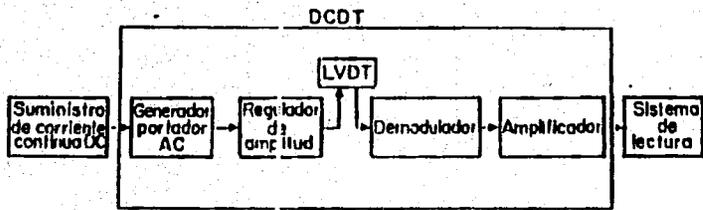


b) Croquis de un acelerómetro de balanza de fuerza. (El voltaje V es proporcional a la fuerza requerida para mantener a la masa en la posición de equilibrio).

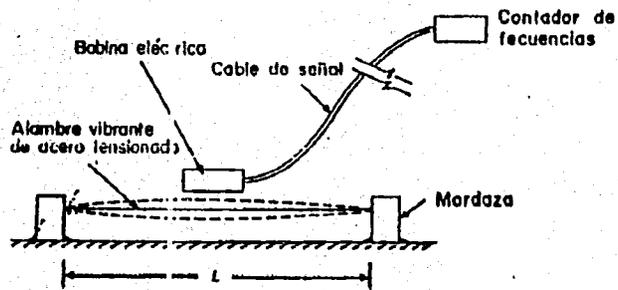
Fig. 7 TRANSDUCTORES ELECTRICOS (continuación)



a) Croquis de un transformador diferencial lineal variable (LVDT)



b) Croquis de un transformador diferencial de corriente directa (DCDT)



c) Croquis de un transductor de cuerda vibrante

Fig. 8 TRANSDUCTORES ELECTRICOS (continuación)

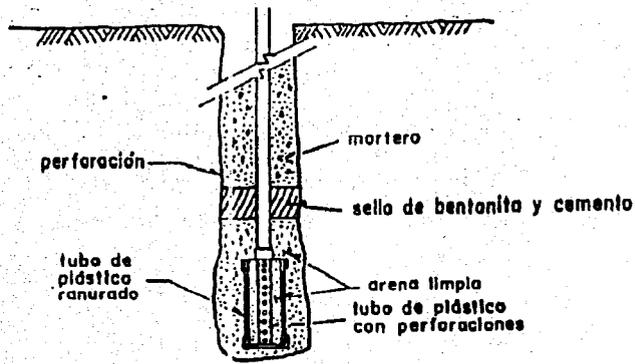


Fig. 9 PIEZOMETRO ABIERTO

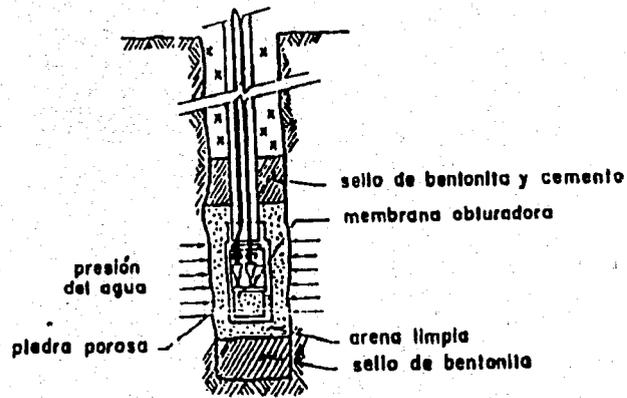


Fig. 10 PIEZOMETRO NEUMATICO

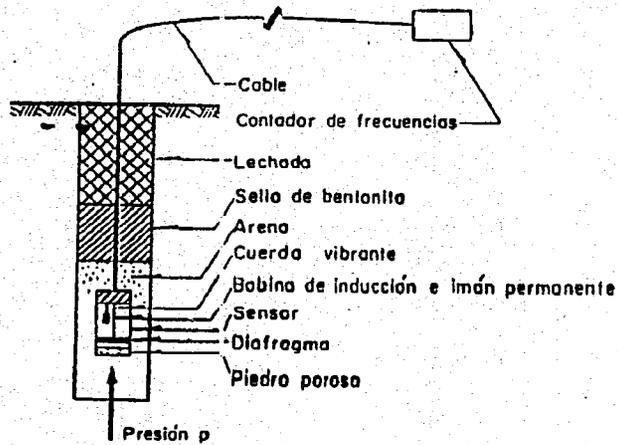


FIG 11 Croquis esquemático de un piezómetro eléctrico a base de transductor de cuerda vibrante

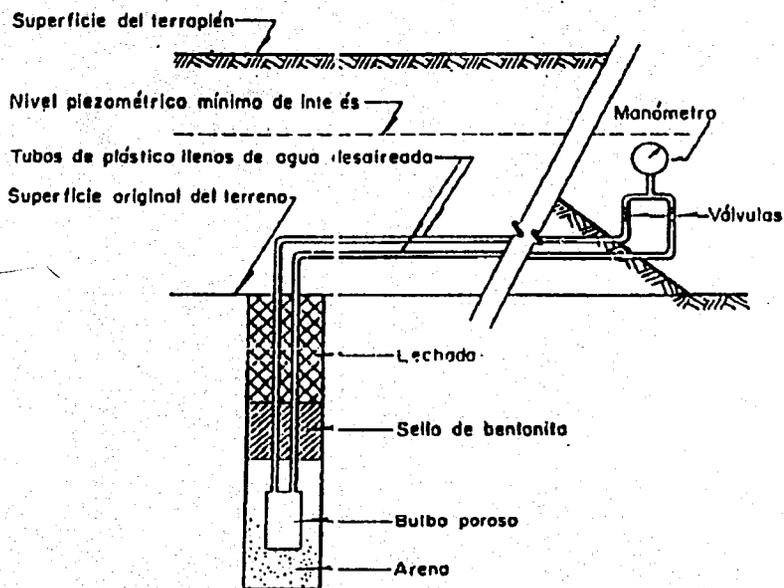


FIG 12 Croquis esquemático de un piezómetro hidráulico cerrado empleado en terrapienes

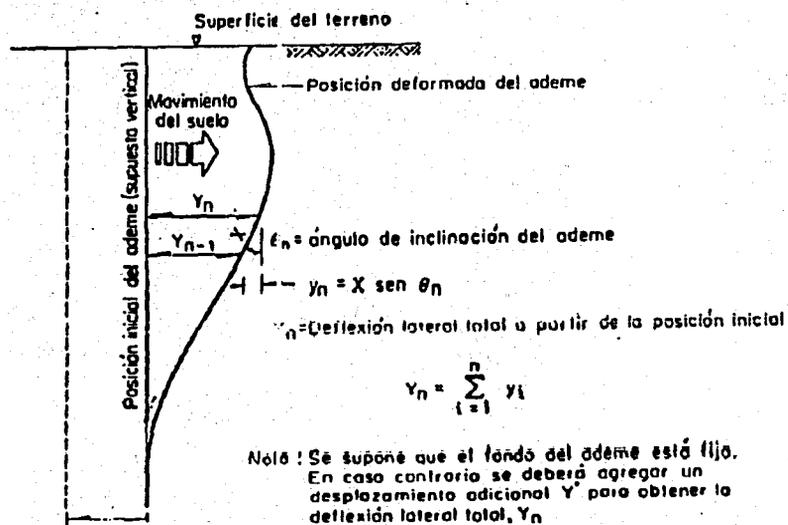
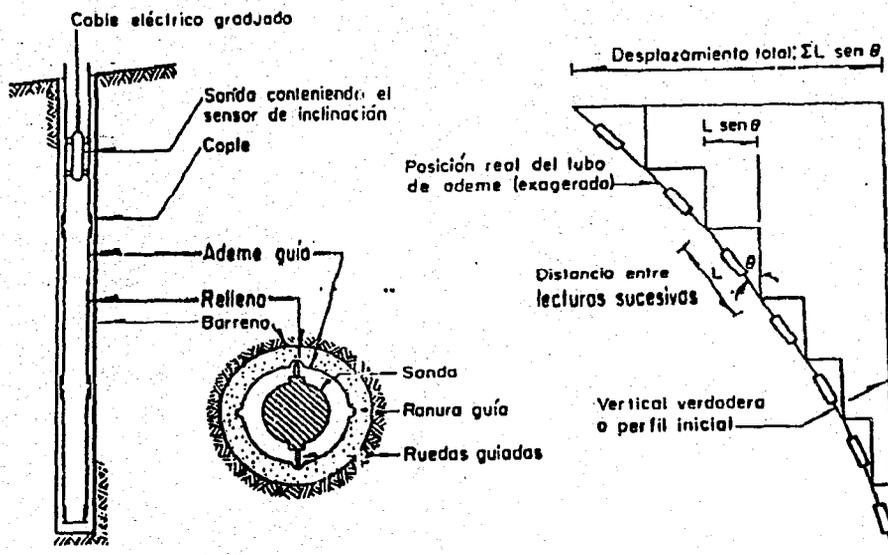
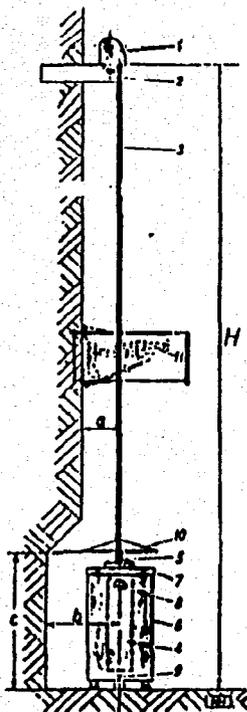


FIG 13 Principio de operación del inclinómetro

PENDULO DIRECTO



PENDULO INVERTIDO

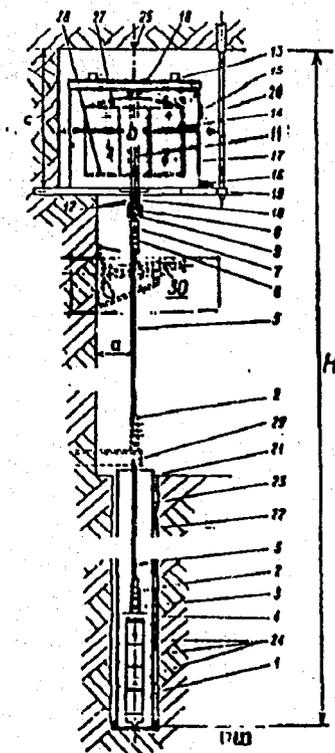


FIG 14. Péndulos para la medición de desplazamientos horizontales.

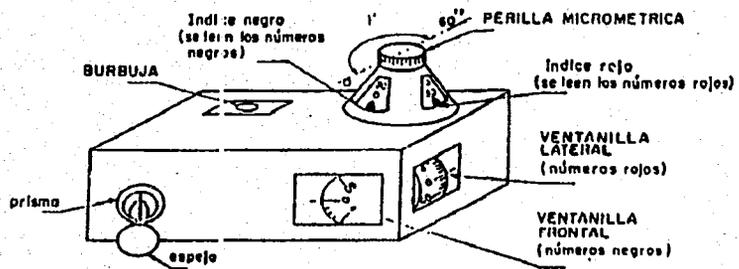
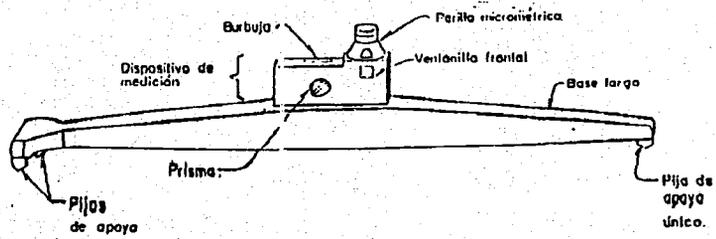
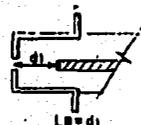
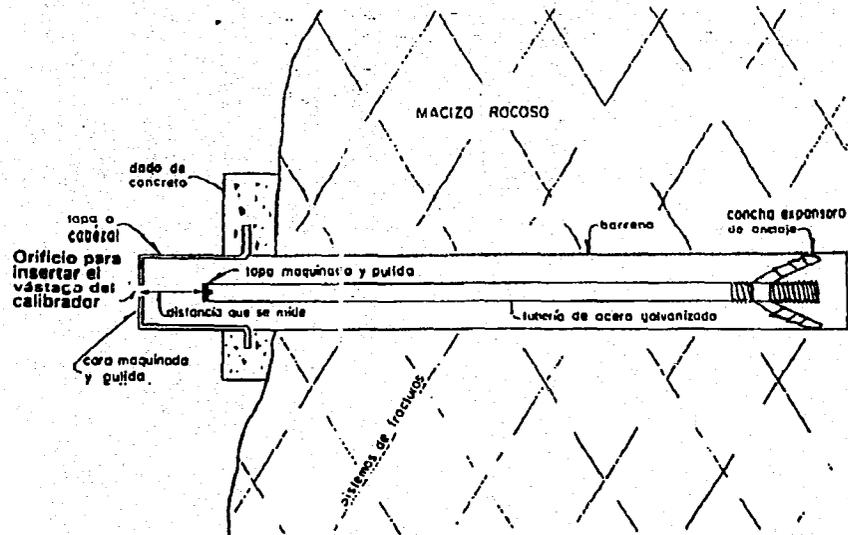
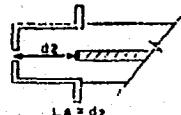


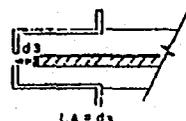
FIG 15. Clinómetro óptico y dispositivo de medición.



LECTURA BASE



DIF = LA - L0
 DIFERENCIA POSITIVA
 ABRE (Reloj suceso)
 EXPANSION



DIF = LA - L0
 DIFERENCIA NEGATIVA
 CIERRA (Control momento)
 CONTRACCION

FIG 16. Funcionamiento y lectura del extensómetro de barra.

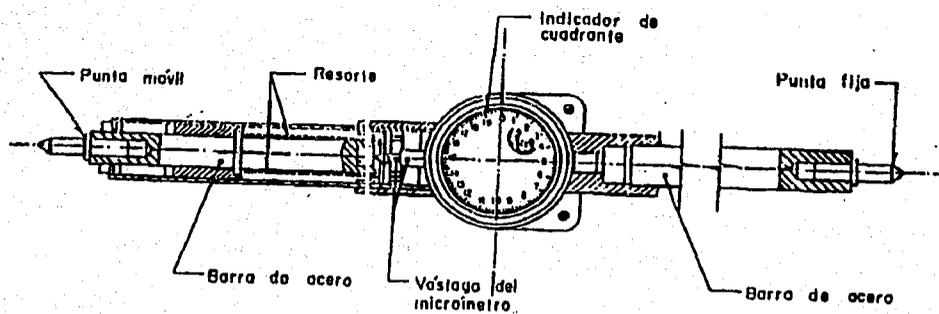
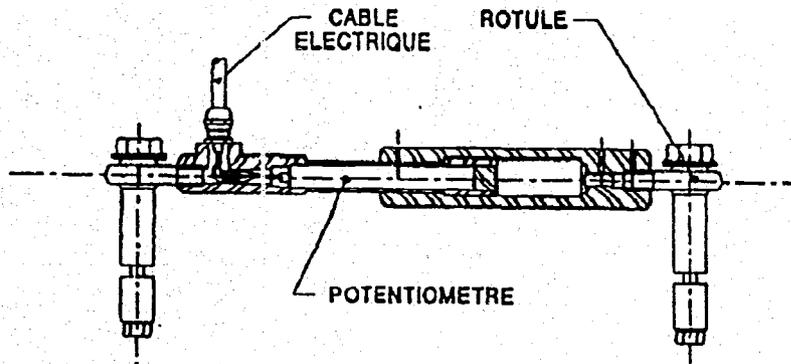


FIG 17. Calibrador extensimétrico.

Modèle REPP



Modèle FIPP

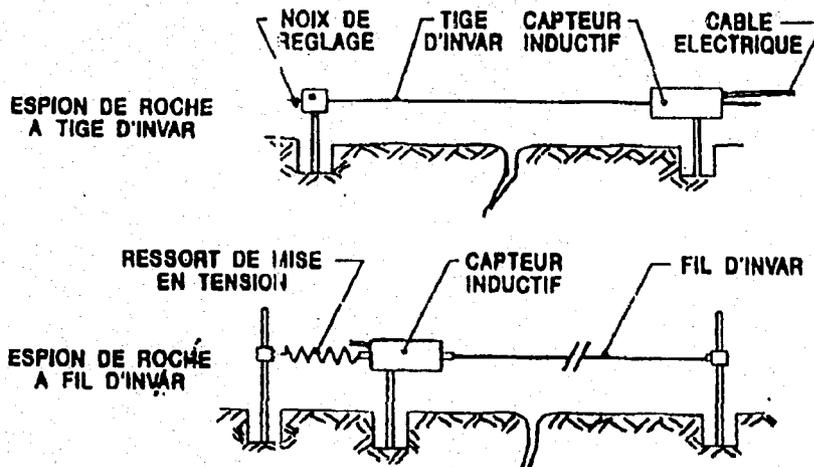


FIG 18. Medidores de grietas fijos.

CAPITULO III

ANALISIS DE ESTABILIDAD

DE TALUDES EN MEDIOS

FRACTURADOS

III PLANTEAMIENTO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MEDIOS FRACTURADOS

A) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y CONCEPTOS GENERALES DEL CÁLCULO DE ESTABILIDAD

La evaluación de estabilidad de macizos rocosos fisurados representa uno de los problemas importantes de la mecánica de rocas.

El factor principal que determina la estabilidad y la resistencia de un macizo rocoso es su **fragmentación natural** que puede ser regular o irregular constituyendo en el macizo rocoso los bloques de diferentes dimensiones y formas, los que definen **la estructura interna del macizo**.

La estabilidad del macizo rocoso solo puede evaluarse correctamente con base de comprensión del mecanismo de falla probable o posible.

Al resolver los problemas que se plantearon por vez primera acerca de la estabilidad de las cimentaciones y taludes rocosos, nadie puso en duda la posibilidad de utilizar, para analizar su comportamiento, las leyes clásicas de mecánica de los medios continuos utilizando la superficie circular de deslizamiento. Todo ese arsenal de medios ya se había empleado con bastante éxito en la descripción de suelos.

Sin embargo, aún cuando es posible aplicar la mecánica del medio continuo a los suelos cuyas partículas son de dimensiones mucho menores que los volúmenes considerados en los cálculos ingenieriles y cuyo grado de aproximación es definido, esas leyes son, como regla general, inaplicables a los macizos rocosos, ya que sus bloques son comparables a los volúmenes considerados.

De otro lado, los esquemas de cálculos hipotéticos, ampliamente aplicados, que representan el macizo en desplazamiento como un cuerpo rígido también son demasiado convencionales y a menudo determinan conclusiones y recomendaciones erróneas.

Este problema adquiere un significado muy importante en la evaluación de la estabilidad de los taludes rocosos de bloques de estructura laminar, pues la orientación de la estratificación y el grado de acción recíproca de los bloques detienen el carácter y cinemática de la falla del talud a deslizarse.

Esto determinan mayores exigencias en las investigaciones geológica y geométrica de tales macizos, realizadas con objeto de recabar información acerca de la estructura y forma de constitución del talud, dimensiones de los bloques constitutivos y características de la resistencia al esfuerzo cortante en las superficies de contacto de las fisuras.

La estabilidad de los macizos rocosos se define por los siguientes factores esenciales:

- ❖ La estructura interna del macizo, determinada por el carácter de su facturación así como por la forma y dimensión de los bloques.
- ❖ La resistencia del macizo al esfuerzo cortante en las fisuras o zonas de debilidad.
- ❖ Las fuerzas actuantes en el macizo rocoso, que son el peso propio del macizo, las cargas aplicadas exteriores, la presencia de un flujo de filtración las aceleraciones sísmicas.

Al mismo tiempo en la naturaleza existe tal variedad de formas y de estructuras de taludes rocosos, que resulta prácticamente imposible estudiarlos todos y proporcionar esquemas de cálculo apegado a cada caso.

En la practica ingenieril para determinar la estabilidad o resistencia de una estructura se utiliza la noción de coeficiente de seguridad.

El coeficiente de seguridad generalmente se entiende como la relación entre las fuerzas de retención y empuje.

$$k = \frac{R}{T} \geq 1 \quad \text{o} \quad k \geq k_o,$$

Donde:

R = Fuerzas de retención (pasivas)
 T = Fuerzas de empuje (activas).

La anterior definición permite relacionar la noción de coeficiente de seguridad con los esfuerzos resistentes máximos y los actuantes.

En los cálculos de estabilidad de taludes rocosos se relaciona el coeficiente de seguridad con la resistencia al esfuerzo cortante existente en la sección considerada.

El coeficiente de seguridad de un talud rocoso significa, algunas veces, que la resistencia al esfuerzo cortante puede ser disminuida en la superficie de deslizamiento considerada, antes que el talud alcance un estado limite.

Existe también otro criterio llamado el déficit de estabilidad o déficit de la fuerza de retención que representa la diferencia entre las fuerzas de empuje y fuerzas de retención:

$$S = T - R < 0 \quad \text{ó} \quad S = T - R < S_0$$

Cada de estos criterios tiene sus ventajas y deficiencias.

La ventaja principal del coeficiente de seguridad K es que él es adimensional y se puede comparar los valores de seguridad de diferentes taludes. Estos valores son muy convencionales y no siempre se puede decir que un talud con el coeficiente de seguridad 1.5, por ejemplo, es más estable que el otro con el coeficiente de seguridad 1.3.

Las deficiencias de este criterio son las siguientes:

- ❖ La representación de un criterio en forma de un cociente dificulta su análisis matemático (por ejemplo. su diferenciación y probabilístico).
- ❖ En caso de estabilización de un macizo con anclas no se sabe a donde meter la fuerza de ancla (F): en numerador, como el aumento de fuerzas de retención o en denominador como la disminución de fuerzas de empuje:

$$k = \frac{R + F}{T} \geq 1 \quad \text{o} \quad k = \frac{R}{T - F} \geq 1.$$

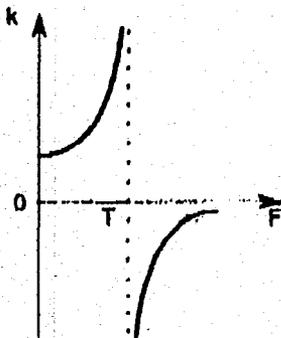


Fig. 1.

Evidentemente los resultados serán distintos. En el segundo caso al aplicar la fuerza $F = T$ el coeficiente de seguridad se convierte a infinito (fig. 1).

El déficit de estabilidad no tiene esas deficiencias y nos da el valor de la carga que tenemos que aplicar al macizo para estabilizarlo.

Para definir la estabilidad de los taludes rocosos, se utiliza el método del equilibrio límite.

A partir de la caracterización del fracturamiento del talud, de su topografía y posibilidad cinemática de deslizamiento, se deduce la forma de la superficie límite de ruptura. Por regla general, esa superficie separa los volúmenes de material rocoso en forma de cuñas y de bloques.

En algunos casos se puede representar, con un grado de aproximación suficiente, la superficie de falla y el macizo que se desplaza en condiciones bidimensionales (un estado plano de esfuerzos). Ese método se aplica ampliamente para los taludes extendidos, cuando la orientación del plano de falla es paralela al talud.

Al examinar la estabilidad hay que tomar en cuenta que durante el proceso de desplazamiento que se inicia es incorrecto presuponer condiciones de equilibrio límite iguales en toda la superficie de deslizamiento, puesto que:

- ❖ La resistencia al esfuerzo cortante en la superficie de deslizamiento no es constante y depende de la magnitud del desplazamiento.
- ❖ Las fuerzas activas y de resistencia no son iguales entre sí en todos los puntos de la superficie de deslizamiento ni actúan simultáneamente, sin mencionar lo equivoco de la hipótesis acerca del reparto regular de los esfuerzos cortantes en él contacto.

El coeficiente de seguridad calculado con base en tales hipótesis resulta engañoso, ya que el proceso de ruptura puede desarrollarse progresivamente, siendo estable el sistema en su conjunto, y con un coeficiente de seguridad global superior a la unidad.

Por ejemplo, en un macizo apoyado en la superficie poligonal el proceso de deslizamiento en la superficie con el ángulo de echado mayor puede empezar mucho antes de llegar a las condiciones límites en la superficie con el echado menor.

Hay muchos ejemplos cuando en la superficie de un escarpe aparecen grietas de tensión y escalones que son los primeros índices de un deslizamiento ya empezado (fig. 2).

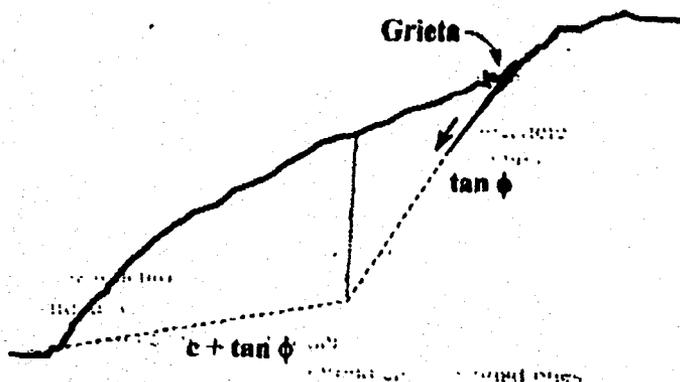


figura. 2. Grieta de tensión en la superficie de un escarpe que es el primer índice de un deslizamiento ya empezado.

Tomando en cuenta que el método del equilibrio límite no considera los desplazamientos del macizo, es necesario escoger un **esquema de cálculo** que asegure que los desplazamientos puedan ocurrir físicamente en la dirección escogida a lo largo de la superficie potencial de falla elegida. Tras haber seleccionado la superficie de falla, se definen en ella los parámetros indispensables de la resistencia al esfuerzo cortante que garantizan el mantenimiento en equilibrio del macizo.

Se realizan tales cálculos para las diferentes combinaciones posibles de los factores actuantes.

Desafortunadamente, la información que existe sobre talud rocoso natural no siempre es segura, lo que dificulta obtener resultados fidedignos.

Ningún cálculo puede ser más exacto que la información inicial que contiene, por lo que el cálculo de estabilidad no debe ser más complejo que lo permitido por nuestros conocimientos respecto al talud rocoso.

Por regla general, antes de iniciar dicho cálculo no conviene plantearse la definición del coeficiente absoluto de seguridad del talud natural considerado, tomando en cuenta que

1, Ninguno de los métodos de cálculo de la estabilidad puede y podrá garantizar una exactitud absoluta.

2. La naturaleza siempre es más compleja y variada que los esquemas inevitablemente simplificados, que pueden examinarse en el cálculo analítico.

El método de cálculo de la estabilidad de los taludes rocosos debe considerarse en primer lugar como un instrumento de análisis cualitativo del nivel de la influencia de diferentes factores en la estabilidad, que permite entender y analizar mejor el comportamiento del talud rocoso sometido a influencias internas variables.

Si la geología del talud es simple y se conocen las superficies potenciales de falla, así como su resistencia al esfuerzo cortante, se puede considerar, que el coeficiente de seguridad obtenido corresponde en cierta medida a la realidad. Si esa misma geología es compleja, si se desconocen las superficies críticas de deslizamiento, las características de su resistencia y el reparto de la presión de filtración, resulta sumamente difícil definir cualquier coeficiente de seguridad de la estabilidad y el que se obtenga será poco fidedigno.

Para definir el valor más seguro del coeficiente de seguridad de un talud rocoso, sería necesario utilizar un **análisis probabilístico** que toma en cuenta las desviaciones posibles de todos los factores naturales y que desemboque en la noción de **confiabilidad** en el sentido de la **probabilidad de la ruptura**.

No siempre es fácil efectuar tal análisis probabilístico y en este caso es útil realizar un análisis comparativo de la influencia a la estabilidad de un macizo rocoso de todos los factores capaces, en cierta medida de intervenir en la alteración de las fuerzas activas, así como en la resistencia en una superficie de deslizamiento potencial.

En la medida en que influencia de los factores considerados en cada caso concreto sea diferente, se conocerán los factores más importantes para definir, en primer lugar, el grado necesario de fiabilidad del talud considerado y, en segundo lugar designar las medidas correspondientes a su estabilización.

Por ejemplo, si los factores más potentes, en su variación entre intervalos prácticamente posibles, pueden provocar la reducción del coeficiente de seguridad de estabilidad en un 20 %, la adopción de un coeficiente de seguridad igual a 1.3 a 1.4 puede probablemente resultar suficiente. Simultáneamente, si esos factores pueden alterar el coeficiente de seguridad en un 40 a un 50 %, un factor de seguridad igual a 2 puede resultar insuficiente. Por tanto, es evidente que no se puede determinar *a priori* o aun normar el coeficiente de seguridad indispensable.

El grado de confiabilidad de un talud rocoso solo puede apreciarse mediante un análisis minucioso de la alteración del coeficiente de seguridad, que varia según los factores que definen en tal o cual medida la estabilidad del talud rocoso.

Al considerar el coeficiente de seguridad k , del macizo como resultado del cálculo de la influencia de una serie de factores esenciales P_i como son:

- ❖ El ángulo de inclinación de las superficies planas potenciales de deslizamiento.
- ❖ Los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en los planos potenciales de deslizamiento.
- ❖ La presión hidrostática de filtración en las fisuras del macizo rocoso.
- ❖ Los parámetros de la influencia sísmica, etc.

Se define la influencia de su posible alteración en el coeficiente de seguridad mediante las derivadas dk/dp_i de las funciones de dependencia

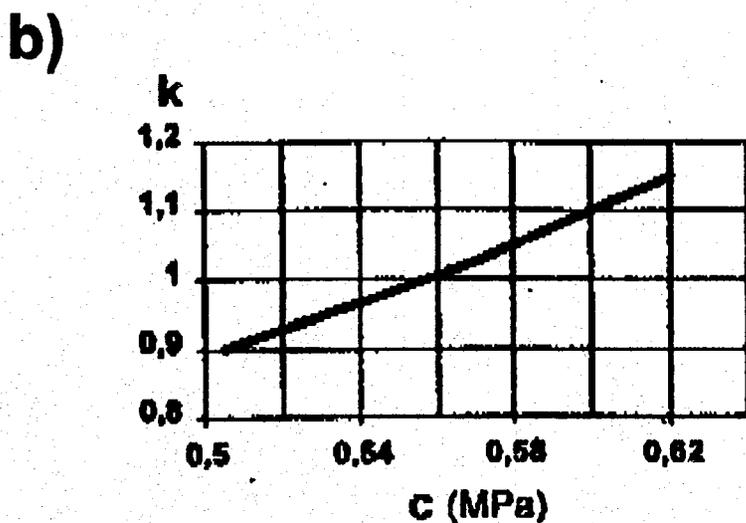
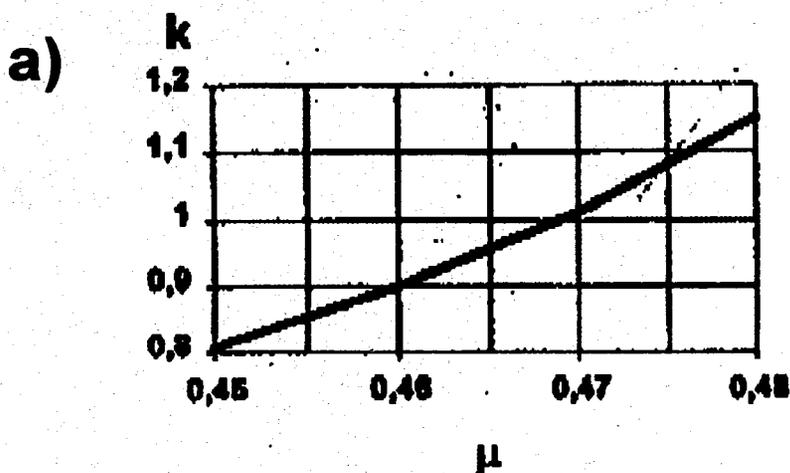
$$k = f(P_i) \quad (i = 1, 2, \dots)$$

Esto señala los factores que más influyen en la estabilidad del macizo, así como su grado de influencia. Además dicho análisis pone de relieve los factores de segundo orden, cuyo calculo riguroso tiene poca importancia para la estabilidad.

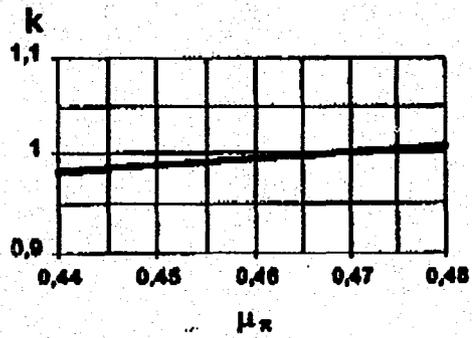
Al eliminar este grupo de factores del examen, se analizan más detalladamente las eventuales consecuencias de la alteración de los factores "fundamentales" y aumenta la fiabilidad de los resultados del cálculo obtenido.

Para evidenciar una posible causa de la alteración de la estabilidad de un talud es preciso señalar, los medios de su estabilización y determinar la fiabilidad de las medidas escogidas.

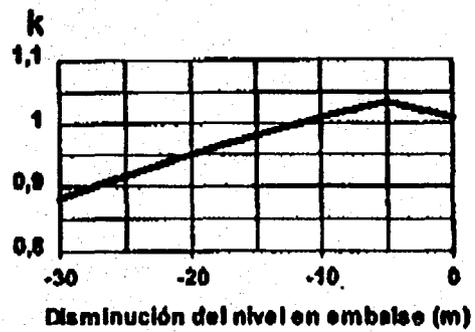
Para cumplir con este objetivo se analizara la influencia en la estabilidad del talud de factores tales como:



c)



d)



e)

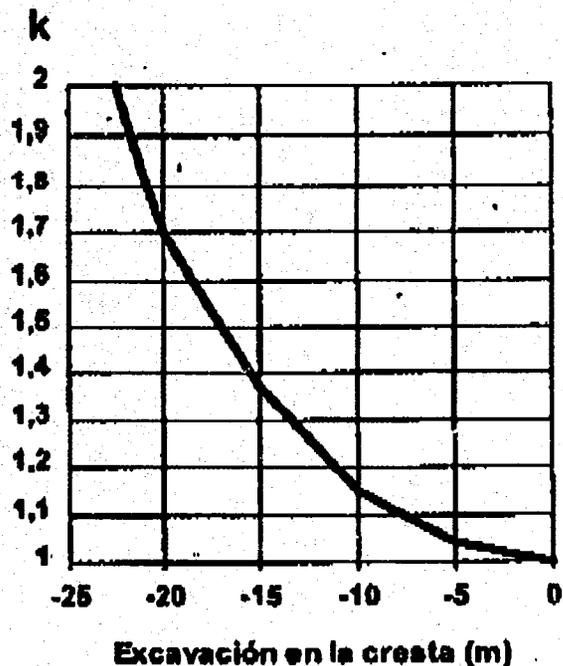


figura 4. Influencia de diversos parámetros en el coeficiente de estabilidad del talud:

- a. Parámetro U en la zona fisurada con echado reducido;**
- b. Parámetro "c" en la zona fisurada con echado reducido;**
- c. Parámetro U en la grieta π ;**
- d. Nivel del agua en el embalse;**
- e. Profundidad del corte "h" a partir de la cresta del talud.**

-
1. La eventual disminución, debida a la saturación, de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en la zona fisurada con echado reducido $tg\phi\pi$ y c , así como del parámetro $tg\phi\pi$ en la fisura con echado elevado π ;
 2. El ascenso y descenso del nivel del agua en el embalse.
 3. La eventual eliminación de roca en la cresta del macizo que se desplaza.

En la fig. 4 están presentadas las gráficas que ilustran la influencia de todos los factores enumerados en el coeficiente de seguridad.

La mayor influencia la ejercen los parámetros de resistencia en la zona fracturada con echado reducido, mientras que la disminución del coeficiente de fricción en la fisura con echado elevado no influye prácticamente en el coeficiente de seguridad.

Es interesante observar que la disminución del nivel del embalse en unos 30 m disminuye el coeficiente de seguridad en 12 %. La misma disminución de la estabilidad del talud provoca la reducción en 2.5 % del parámetro $tg\phi$ en la zona con echado reducido.

Por consiguiente, si hasta que se llene el embalse el talud se encuentra en un estado casi límite, que es generalmente el de casi todos los taludes naturales, el aumento del nivel en el embalse puede incrementar su estabilidad, con tal de que ese aumento no se acompañe de la saturación simultánea de la superficie de deslizamiento, lo que a su vez puede provocar la disminución de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en esa superficie.

En la medida en que una disminución insignificante de esos parámetros de resistencia pueda acarrear una disminución considerable de la estabilidad del talud, se supondrá que debido a la saturación de la zona fisurada de deslizamiento, el talud adquiere de nuevo un estado límite con un coeficiente de estabilidad $k = 1$.

La consecutiva disminución del nivel del agua en el embalse tendría que haber puesto en movimiento al macizo, lo que comprobó en la realidad pues al bajar el nivel del embalse de 7m. a 8 m., se presentó un incremento marcado de los desplazamientos.

Para estabilizar el macizo se consideró la posibilidad de suprimir roca de cresta. Como lo mostraron los cálculos (fig. 4,e), la profundidad de roca que se elimina influye mucho en el aumento de la estabilidad: la eliminación de 20 m de roca aumenta el coeficiente de seguridad en 70 %.

De esta manera, el análisis efectuado, permitió evidenciar las causas de la alteración de la estabilidad de talud y proponer medidas para su, estabilización. La eliminación de 15 a 20 m de roca en la cresta del macizo resulta, en este caso, un medio muy eficaz y seguro para estabilizarlo.

B) MÉTODO DE CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS EN UNA SUPERFICIE POLIGONAL DE DESLIZAMIENTO

En la práctica ingenieril, se encuentran frecuentemente taludes rocosos cuya estructura es imprecisa o variable.

Examinamos el método de cálculo de estabilidad, basado en el principio del déficit de las fuerzas de retención.

El principio del cálculo consiste en el examen consecutivo de bloques rocosos, que descansan sobre diferentes superficies de deslizamiento, empezando con las de echado elevado.

Como se sabe, el estado limite casi nunca se presenta simultáneamente en toda la superficie de deslizamiento, y el proceso de falla, que primero se manifiesta en forma de deformaciones y desplazamientos locales, empieza por lo general en una fisura de echado elevado.

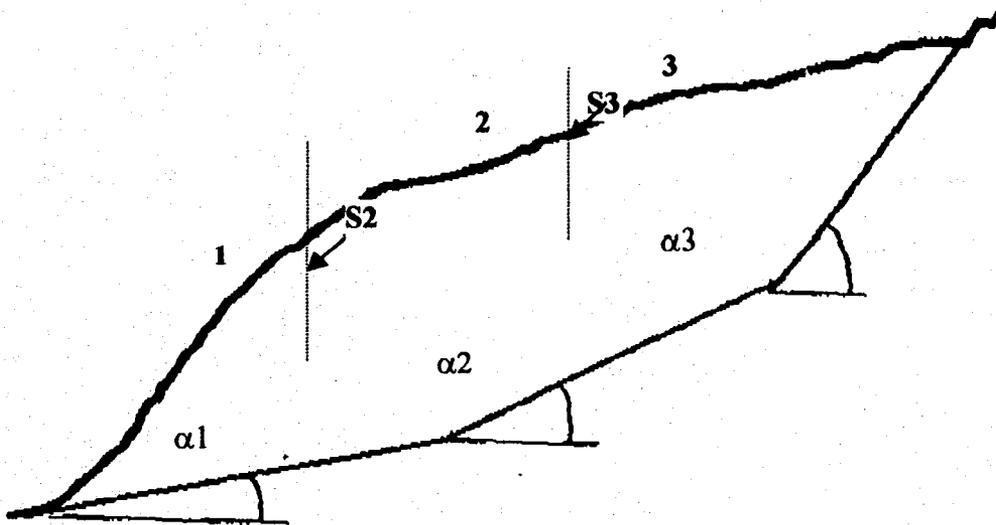


figura 5. Esquema de cálculo de un macizo rocoso en una superficie poligonal de deslizamiento.

Si, por ejemplo, la superficie poligonal de deslizamiento está compuesta de 3 planos (fig. 5), se empieza el análisis de estabilidad del bloque superior (No 3). Si su estabilidad en la superficie de apoyó de echado elevado no esta garantizada y surge la posibilidad de un desplazamiento, entonces se apoya en el bloque No 2, situado junto a el, transmitiéndole su fuerza.

$$S_3 = G_3 (\text{sen } \alpha_3 - \mu_3 \text{ cos } \alpha_3) - c_3 \omega_3,$$

donde;

G = peso propio del bloque

α = ángulo del echado de la superficie de deslizamiento

$\mu = \text{tg } \varphi$ - coeficiente de fricción

c = cohesión

ω = superficie de deslizamiento.

En el cálculo de la estabilidad a largo plazo de un talud no hay que tomar en cuenta la cohesión en una fisura de echado elevado, lo cual significa que se puede despreciar el último miembro de la ecuación.

Considerando luego las condiciones de equilibrio del bloque 2, se define la fuerza que transmite al bloque 1, situado junto a el

$$S_2 = G_2 (\text{sen } \alpha_2 - \mu_2 \text{ cos } \alpha_2) + S_3 [\text{cos } (\alpha_3 - \alpha_2) - \mu_2 \text{ sen}(\alpha_3 - \alpha_2)] - c_2 \omega_2$$

Para el bloque i puede escribirse en términos generales

$$S_i = G_i (\text{sen } \alpha_i - \mu_i \text{ cos } \alpha_i) + S_{i+1} [\text{cos } (\alpha_{i+1} - \alpha_i) - \mu_i \text{ sen}(\alpha_{i+1} - \alpha_i)] - c_i \omega_i$$

donde i es la numeración del bloque de abajo hacia arriba en la superficie de deslizamiento.

En los casos en que un macizo rocoso fisurado no puede resistir fuerzas de tracción, en el cálculo solo se toman en cuenta los valores positivos de S_i , reduciendo a cero simultáneamente sus valores negativos.

El coeficiente de estabilidad puede obtenerse por medio de su cálculo con los parámetros de resistencia en todas las superficies consideradas, suponiendo un estado limite en la superficie de echado elevado

$$k = \frac{\mu_1 [G_1 \text{ cos } \alpha_1 + S_2 \text{ sen}(\alpha_2 - \alpha_1)] + c_1 \omega_1}{G_1 \text{ sen } \alpha_1 + S_2 \text{ cos}(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

1) Cálculo de la presión hidrostática del agua de filtración

La presión de la corriente de filtración se define en cada una de las dovelas consideradas del macizo rocoso, mediante las profundidades de la línea superior de flujo en los límites laterales del compartimiento, ξ_1 y ξ_2 .

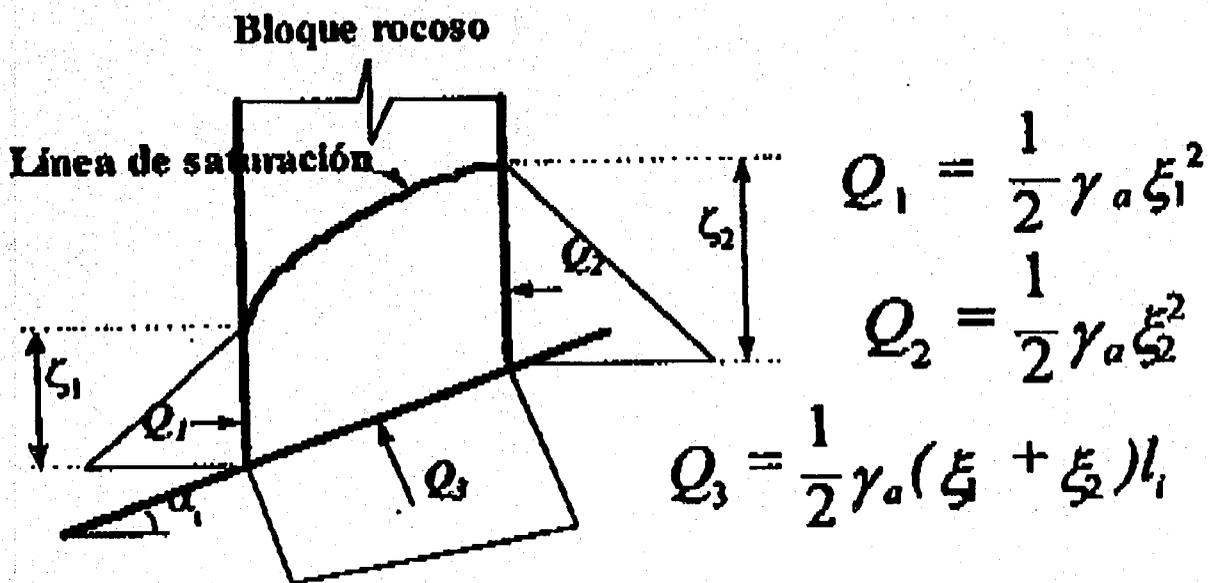


figura 6. Las fuerzas principales de la presión hidrostática del agua de filtración

Las principales fuerzas activas se escribirán (fig. 6).

$$Q_1 = \frac{1}{2} \gamma_a \xi_1^2, \quad Q_2 = \frac{1}{2} \gamma_a \xi_2^2 \quad \text{y} \quad Q_3 = \frac{1}{2} \gamma_a (\xi_1 + \xi_2) l_i$$

Al tomar en cuenta esas fuerzas, el déficit para la estabilidad de la dovela i será

$$S_i = G_i (\text{sen } \alpha_i - \mu_i \text{cos } \alpha_i) + \frac{1}{2} \gamma_a (\xi_{i2} + \xi_{i1}) [(\xi_{i2} + \xi_{i1}) (\text{cos } \alpha_i + \mu_i \text{sen } \alpha_i) + \mu_i l_i] + S_{i,i-1} [\text{cos}(\alpha_{i,i-1} - \alpha_i) - \mu_i \text{sen}(\alpha_{i,i-1} - \alpha_i)] - c_i l_i$$

El coeficiente de seguridad de la última dovela es

$$k = \frac{\mu_1 [\cos \alpha_1 + S_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - Q_3] + c_1 \omega_1}{G_1 \sin \alpha_1 + S_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) + (Q_2 - Q_1) \cos \alpha_1}$$

C) CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE BLOQUES ROCOSOS TRIDIMENSIONALES

En el análisis de la estabilidad de taludes rocosos fisurados, así como de excavaciones subterráneas, surge a menudo la necesidad de evaluar la estabilidad de ciertos bloques tridimensionales del macizo rocoso, separados por diferentes grietas o fisuras.

El desplazamiento de tales bloques rocosos puede ocurrir en:

- ❖ Una superficie de fisura.
- ❖ Dos superficies de fisuras (por el ángulo diedro formado por esas fisuras).

Existen dos tipos de proyección estereográfica de una esfera en una superficie plana:

Proyección de "igual área" en la cual las áreas producidas por la proyección de ángulos sólidos son iguales en toda la esfera (Proyección de Lambert o Schmidt). Este tipo de proyección de esfera se utiliza en la geografía para los mapas. En la geología estructural se utiliza este tipo de proyección para calcular la densidad de fisuras, determinar la existencia de familias de fisuras y sus características principales (azimuts y ángulos de echado). Un ejemplo de la proyección estereográfica de "igual área" está presentado en la fig. 1.

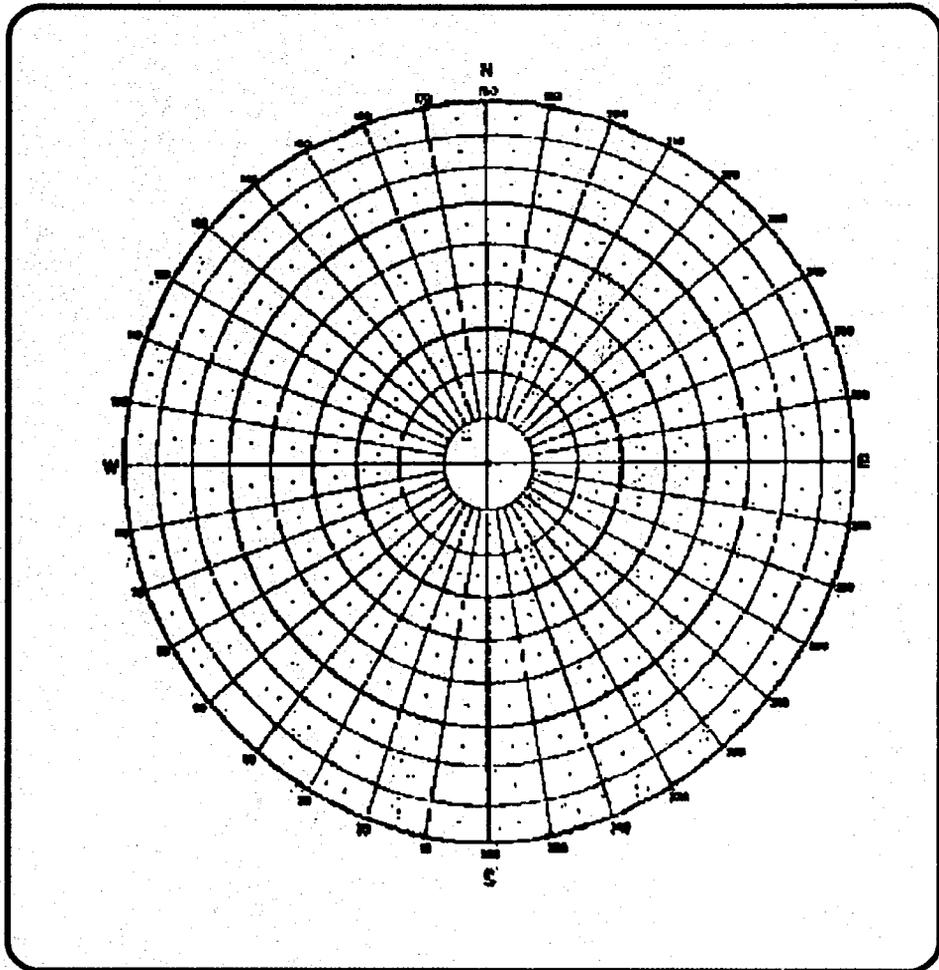


Fig. 1 Proyección estereográfica de "igual área"
A. Proyección Polar

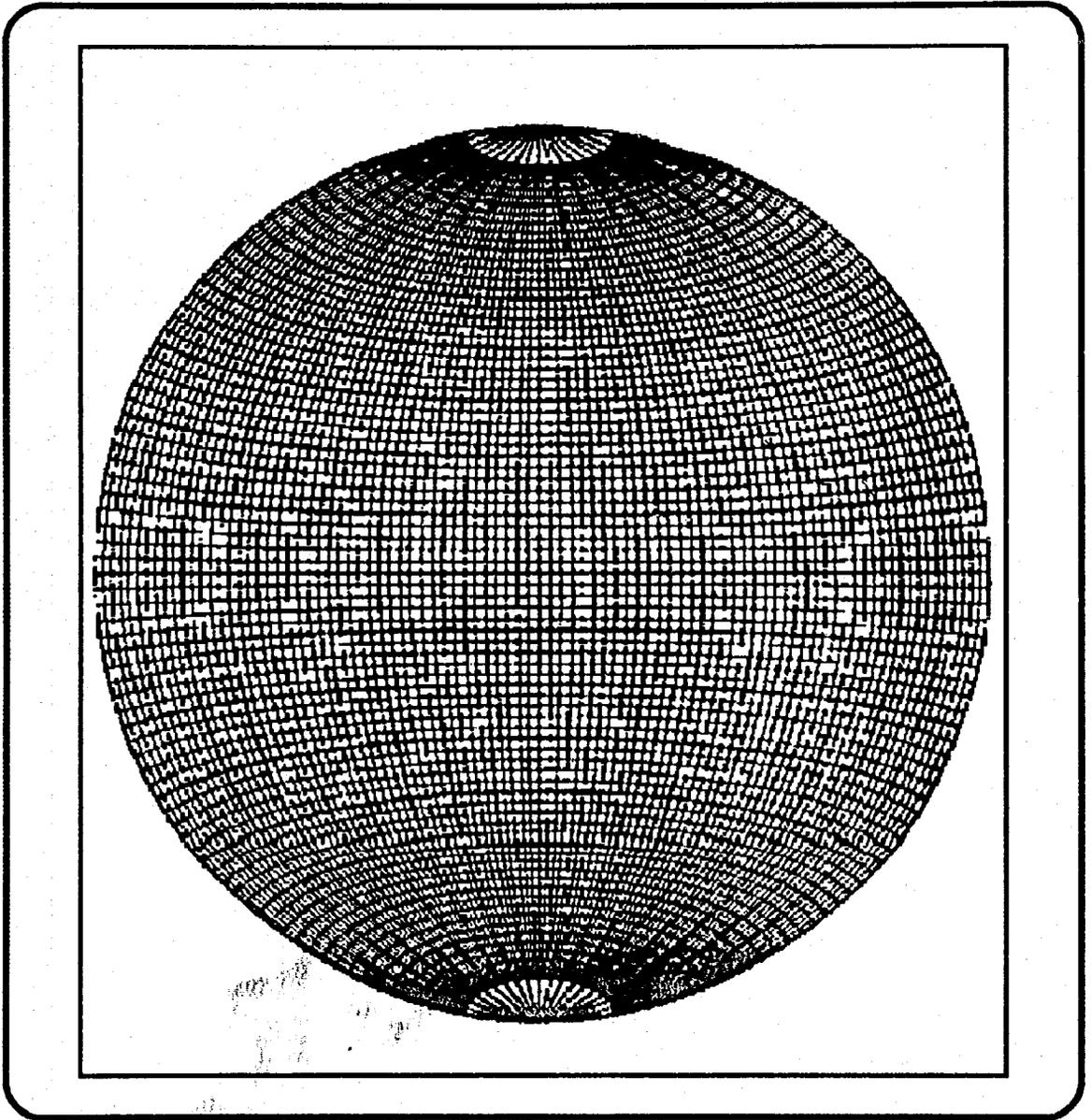


Fig. 1 Proyección estereográfica de "igual área"
B. Proyección ecuatorial.

Proyección "equiángulo"

Una de las particularidades más importantes y características de esa proyección estereográfica es que todos los ángulos de la superficie de la esfera conservan, en proyección, su magnitud (no se alteran) y que todas las circunferencias (tanto las grandes como las pequeñas) de la superficie de la esfera conservan su forma en la proyección. Este tipo de proyección se utiliza para los cálculos de estabilidad. Un ejemplo de la proyección estereográfica "equiángulo" esta presentado en la fig. 2.

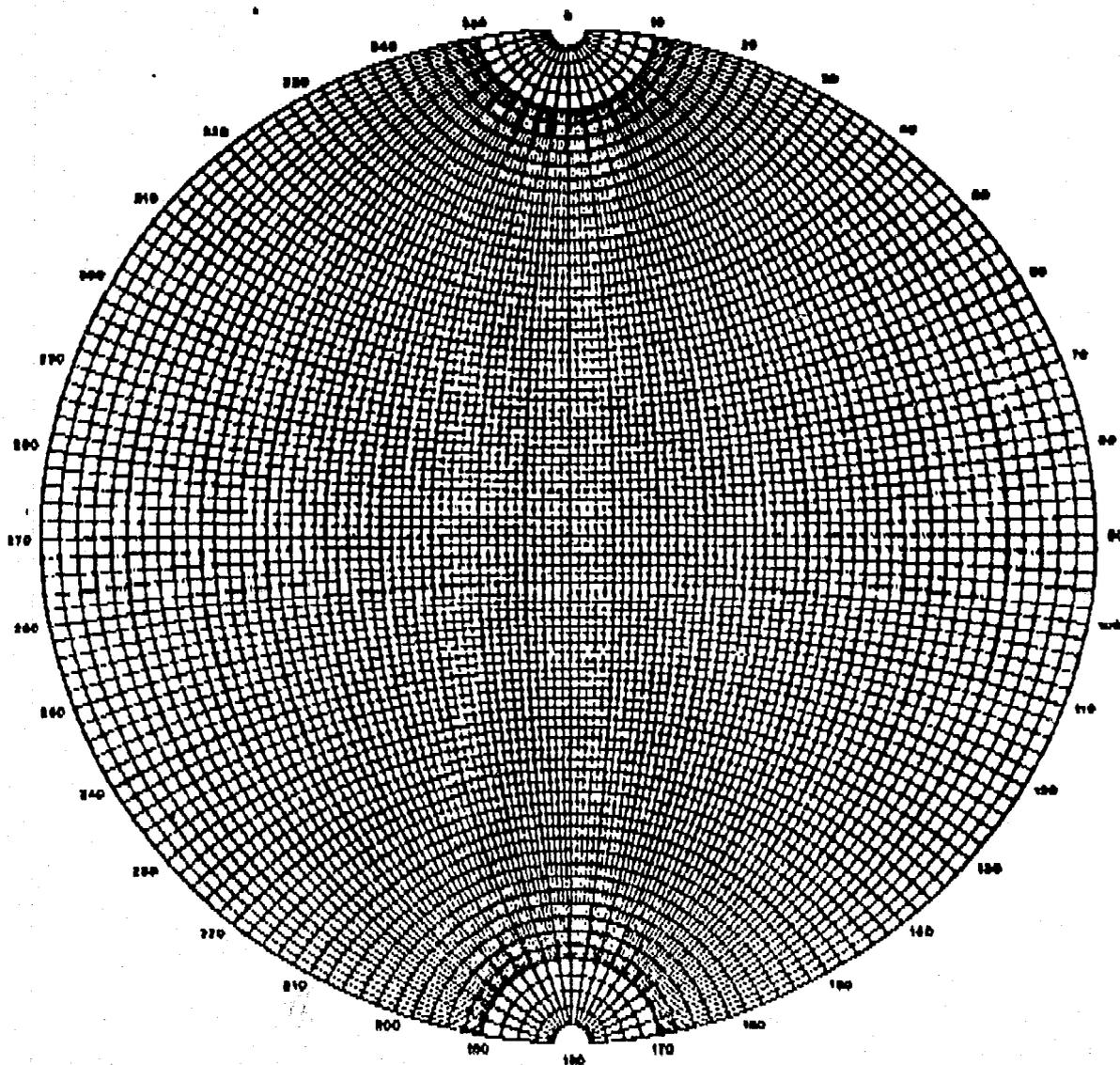


fig. 2. Proyección estereográfica ecuatorial "equiángulo"

Cuál es el principio de la proyección estereográfica de una esfera en una superficie plana?

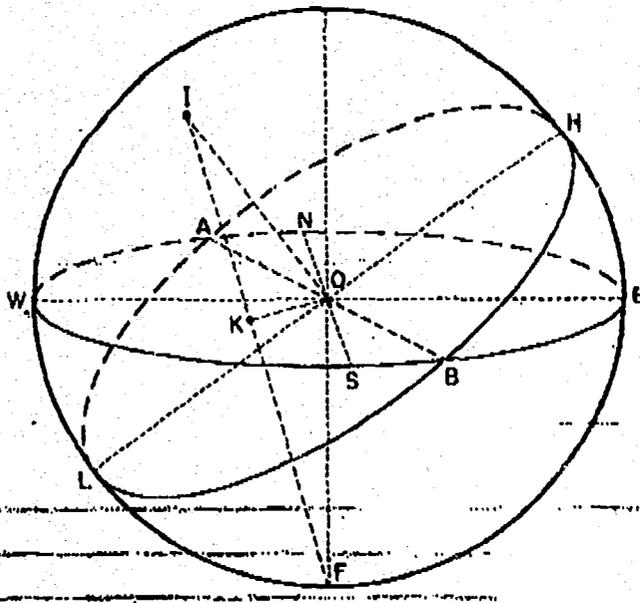


fig. 3. Principio de la proyección estereográfica de una esfera en una superficie plana

Considérese una esfera de radio libre (fig. 3). Supóngase que el observador este en el polo inferior F y vea toda la esfera reflejada en la superficie ecuatorial. Eso es una proyección estereográfica en una superficie plana. Toda la semiesfera superior se proyecta dentro la circunferencia de la superficie ecuatorial.

Supóngase que AHB sea la sección de la esfera por una superficie inclinada que pasa por su centro, y OI - la normal a esa superficie inclinada que representa el plano de una fisura.

La proyección del punto I (de la normal al plano de la fisura) en la superficie ecuatorial será el punto K. Este punto en el diagrama representa la fisura con su azimut y ángulo de echado.

Para la proyección "equiángulo" la distancia del punto del centro de la proyección será:

$$r = R \cdot \tan \alpha / 2$$

Y para la proyección de "igual área":

$$r = \sqrt{2}R \operatorname{sen} \alpha / 2$$

en donde R es el radio del diagrama.

D) ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MEDIOS HOMOGÉNEOS

Al observar los taludes rocosos puede uno darse cuenta de que mientras muchos son estables con ángulos de inclinación pronunciados y decenas de metros de altura, muchos otros taludes menos pronunciados y de unas cuantas decenas de altura fallan. Esta diferencia en sus condiciones de estabilidad es el resultado de la inclinación de la superficie de discontinuidad sobre la cual el deslizamiento toma lugar.

La falla circular de un talud se presenta cuando no existe un patrón definido de fracturamiento. Es decir en un estereograma se observan una distribución uniforme de los polos.

Este tipo de falla ocurre principalmente en suelos, en rezaga de rocas altamente fracturadas, como ya se menciona, sin un patrón definido de fracturas. También ocurre en rocas homogéneas, sin fracturas, pero de débil cementación como es el caso de las tobas.

El estudio de la estabilidad de este tipo de materiales se trata de acuerdo a las teorías clásicas de Mecánica de Suelos donde se emplea el denominado Método Sueco.

1.- Condiciones para que se genere una falla de tipo circular

En el caso de un suelo no existe un patrón de fracturamiento preferente y la superficie de falla es libre de encontrar la línea de menor resistencia que existe dentro de la ladera.

La condición bajo la cual la falla circular aparece surge cuando las partículas individuales de suelo o roca son muy pequeñas comparadas con las dimensiones del talud y cuando esas partículas no se encuentran íntimamente interconectadas (trabajadas), como resultado de su forma. De aquí que, los depósitos de talud se comporten como un suelo y ocurran fallas de grandes dimensiones con superficies circulares. Las rocas altamente intemperizadas y alteradas tenderán también a fallar de este modo.

En un problema específico deberá tomarse en cuenta los cambios de materiales, sus propiedades mecánicas, las fuerzas actuantes sobre el talud las restricciones de deformabilidad impuestas. el flujo de agua y la geometría de la excavación.

2.- Construcción de las cartas de estabilidad

Se hicieron las siguientes hipótesis en la elaboración de estas cartas de estabilidad.

- ❖ El talud está formado por un material homogéneo e isotrópico.
- ❖ El esfuerzo cortante del material está caracterizado por una cohesión C y un ángulo de fricción interna ϕ , los cuales se encuentran relacionados por la ecuación de Coulomb:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

- ❖ La superficie de falla se asume que es circular y que pasa por el pie del talud (solo cuando $\phi > 5$ grados).
- ❖ Existe una grieta de tensión vertical en la cresta o en la cara del talud.
- ❖ La localización de la grieta de tensión y de la superficie de falla es tal, que el factor de seguridad de la ladera es mínimo para la geometría del talud y condiciones de flujo de agua considerados.
- ❖ En el análisis se considera un amplio rango de condiciones de flujo de agua dentro del talud que van de un suelo totalmente seco a una masa totalmente saturada.

El factor de seguridad se definirá cómo:

$$F = \frac{\text{(Resistencia al esfuerzo cortante disponible para resistir el deslizamiento)}}{\text{(Esfuerzo cortante movilizado a lo largo de la superficie de falla)}}$$

Ya que la resistencia al esfuerzo cortante es función de la distribución del esfuerzo normal y dado que esta distribución no es conocida, el problema resulta estáticamente indeterminado. Para obtener una solución es necesario asumir una distribución de esfuerzos normales. Encontró que el factor de seguridad mínimo ocurre cuando se asume que el esfuerzo normal se encuentra concentrado en un punto singular de la superficie de falla. Similarmente, el límite superior se encuentra cuando se asume que el esfuerzo normal se encuentra concentrado en los dos puntos extremos de la superficie de falla.

3.- Consideraciones para el flujo de agua

Para calcular las fuerzas de subpresión debidas a la presión de agua actuante en la superficie de falla y en la grieta de tensión, es necesario suponer una serie de patrones de flujo que se aproximen lo más posible a las condiciones en campo.

En las rocas fracturadas se supone que el agua fluye en las discontinuidades y que la sustancia rocosa es prácticamente impermeable. En este caso la permeabilidad de la masa rocosa es varias veces superior y se genera un flujo general de agua en la masa.

4.- Generación de las cartas de estabilidad

Las cartas se elaboraron buscando la combinación más crítica de la superficie de falla con la grieta de tensión para cada condición de flujo de agua y geometría del talud. Consideraciones especiales fueron hechas para la ubicación de la grieta de tensión ya sea en la cara o cresta del talud. Comprobaciones detalladas se realizaron en las zonas del pie del talud donde la curvatura de las líneas equipotenciales resultan en un flujo local.

Las cartas están numeradas del 1 al 5 que corresponden con las condiciones de flujo ilustradas en la figura anexa.

5.- Uso de las cartas de estabilidad

para determinar el factor de seguridad para un talud particular deben seguirse los pasos siguientes:

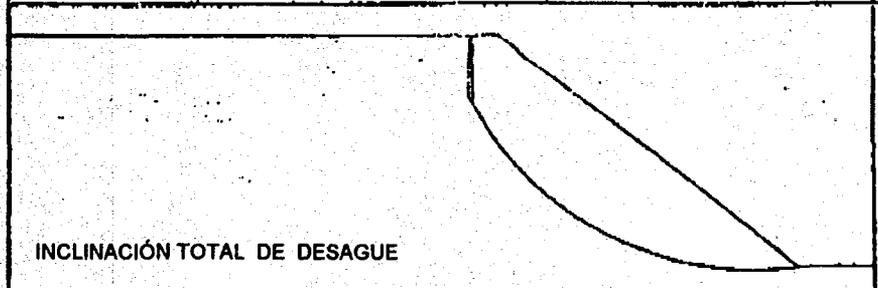
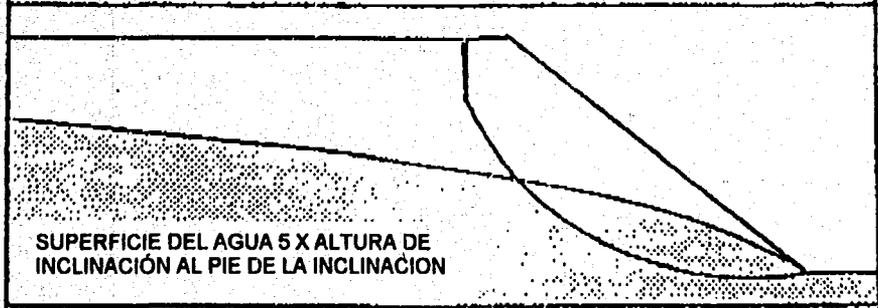
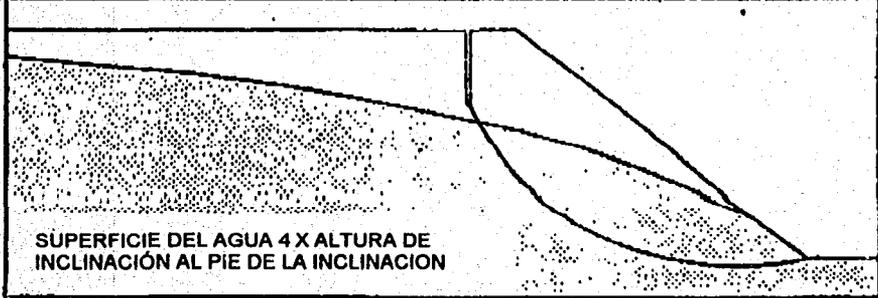
- ❖ Defina las condiciones de flujo de agua y escoger la carta acorde con ésta.
- ❖ Calcular la relación adimensional:

$$c / (\gamma H \cdot \tan\phi)$$

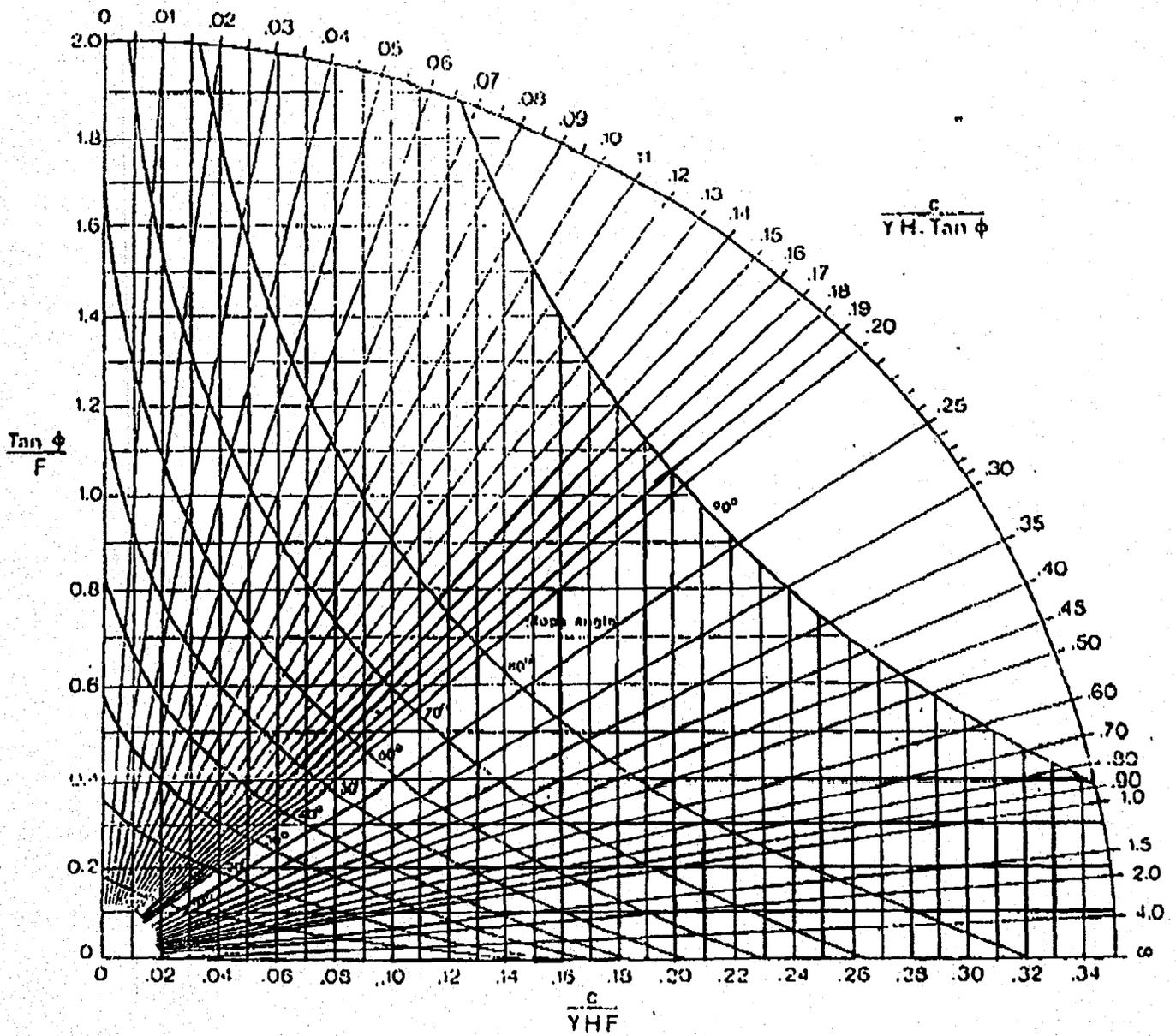
Encuentre este valor en la escala circular superior de la carta correspondiente.

- ❖ Siga la línea radial desde el valor determinado en el paso 2 hasta la curva que corresponde al ángulo de inclinación del talud.
- ❖ Encuentre los valores correspondientes a: $\tan \phi / F$ ó $c / \gamma HF$; dependiendo de cual sea más conveniente, y despeje el factor de seguridad F .

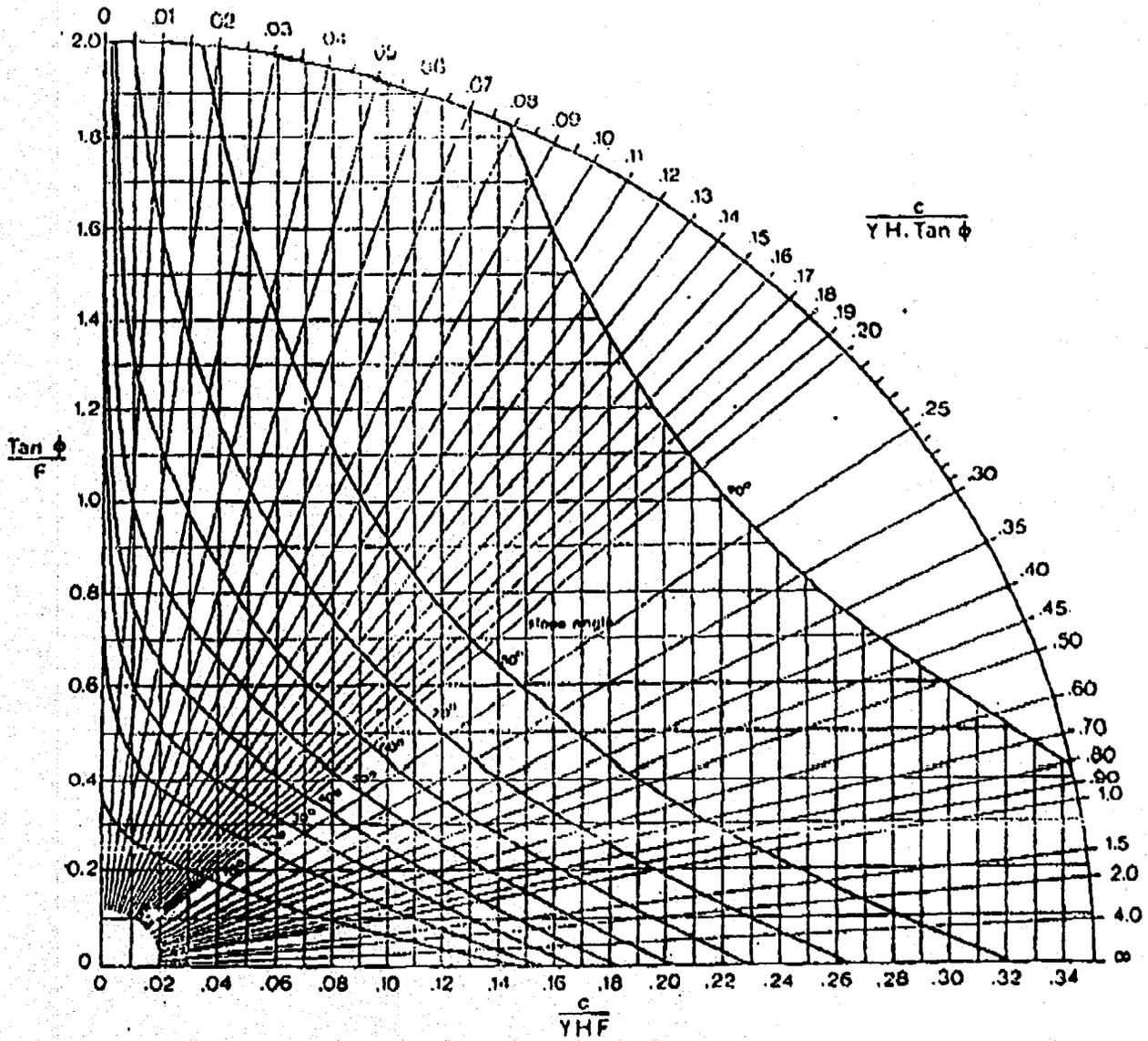
Debido a la simplicidad y velocidad de uso de estas cartas, resultan ideales para jugar con la sensibilidad del factor de seguridad del talud para un amplio rango de condiciones. Este debe ser el papel de estas cartas y después proceder a un análisis más refinado.

CONDICIONES DE CORRIENTE DE AGUA	
 <p data-bbox="107 671 478 701">INCLINACIÓN TOTAL DE DESAGUE</p>	1
 <p data-bbox="107 950 521 999">SUPERFICIE DEL AGUA 5 X ALTURA DE INCLINACIÓN AL PIE DE LA INCLINACION</p>	2
 <p data-bbox="107 1258 521 1308">SUPERFICIE DEL AGUA 4 X ALTURA DE INCLINACIÓN AL PIE DE LA INCLINACION</p>	3
 <p data-bbox="107 1556 521 1606">SUPERFICIE DEL AGUA 2 X ALTURA DE INCLINACIÓN AL PIE DE LA INCLINACION</p>	4
 <p data-bbox="107 1854 506 1904">INCLINACIÓN SATURADA SOMETIDA A LA SUPERFICIE PESADA DE RECARGA</p>	5

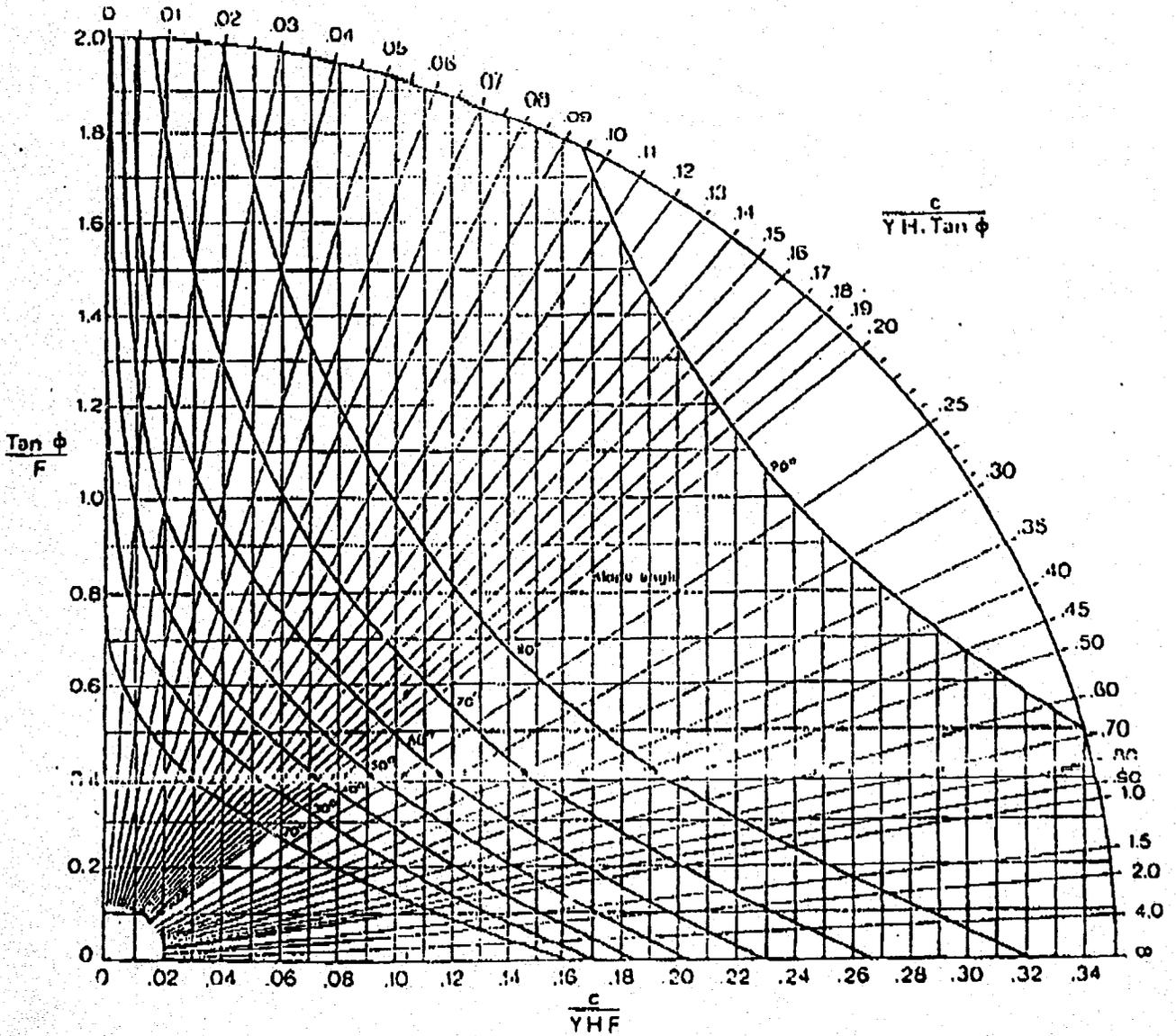
MAPA CIRCULAR DE FALLA NUMERO 1



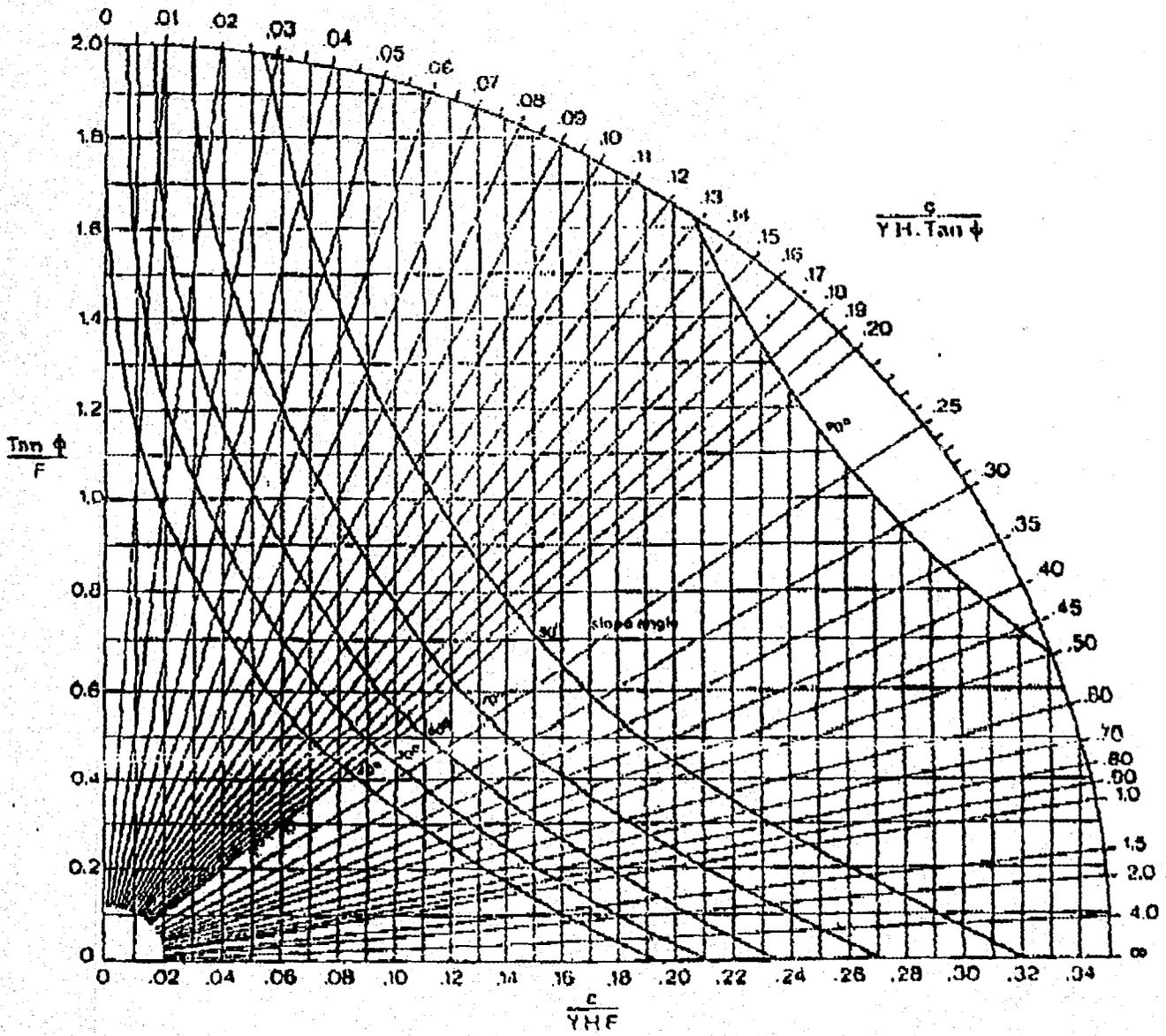
MAPA CIRCULAR DE FALLA NUMERO 2



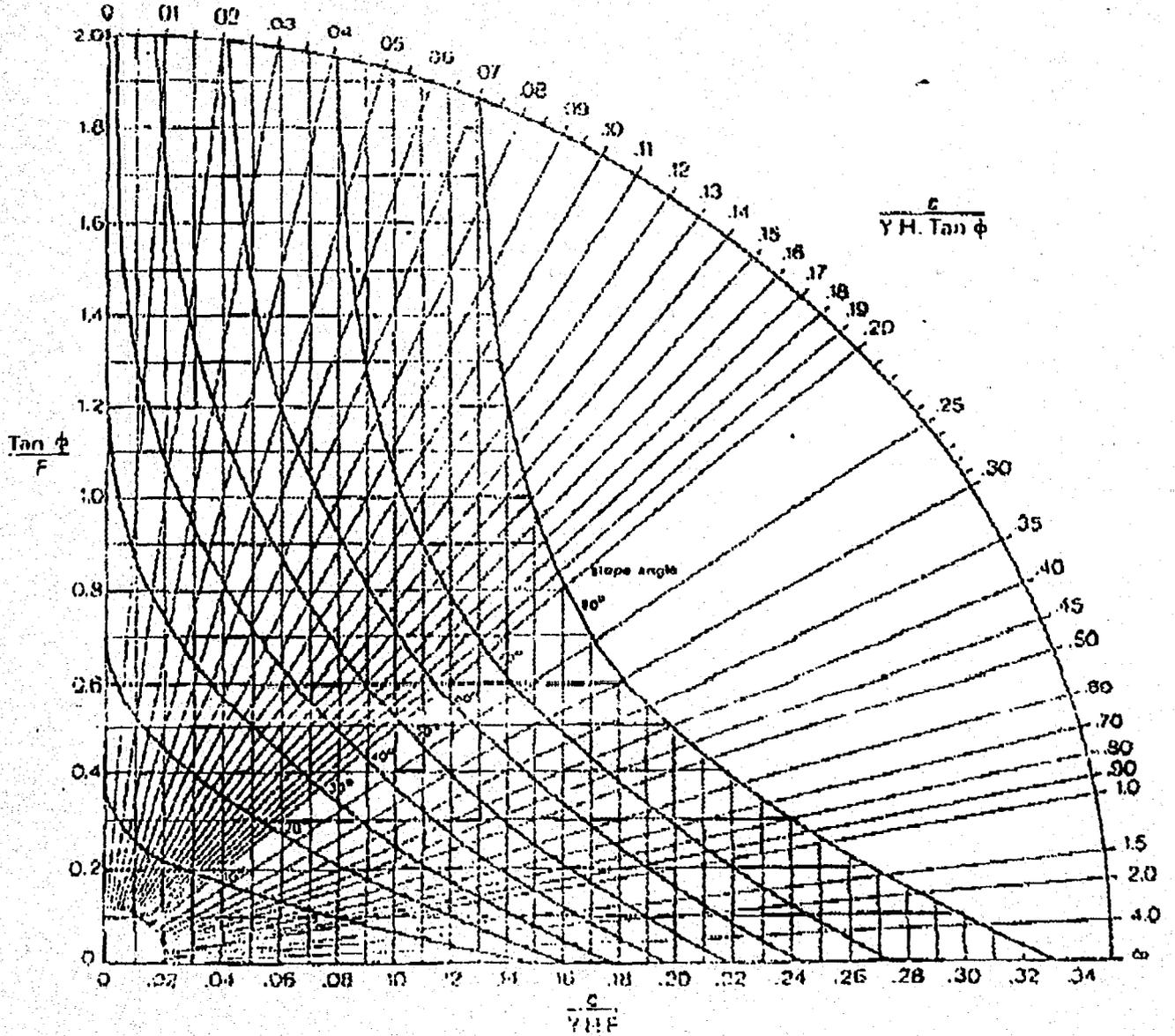
MAPA CIRCULAR DE FALLA NUMERO 3



MAPA CIRCULAR DE FALLA NUMERO 4



MAPA CIRCULAR DE FALLA NUMERO 5



CAPITULO IV

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD DE ROCA UTILIZANDO VECTORES

IV ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD EN ROCA UTILIZANDO VECTORES

Una masa rocosa siempre se encuentra afectada por un conjunto de discontinuidades cuya naturaleza y características dependen de la historia geológica a la que fue sometida. Por lo general, estas discontinuidades muestran orientaciones preferentes que permiten agruparlas por familias, las cuales, por otro lado, tienden a dividir a la masa rocosa en bloques o cuñas de volumen variable y de formas más o menos regulares. La posición espacial que guardan los bloques o cuñas y la resistencia al corte que se genera en las superficies delimitantes de estas cuñas son factores preponderantes que determinan la estabilidad de un talud; es decir, el riesgo de que una cuña rocosa se mueva en tal o cual dirección.

Es común efectuar el análisis detallado de un talud para definir la estabilidad de una cierta cuña rocosa formada por los planos de discontinuidades prevalecientes. Este análisis, independientemente del método utilizado, conlleva finalmente a encontrar el factor de seguridad, el cual es un valor numérico que indica cuanto más grandes o pequeñas son las fuerzas que se oponen al movimiento en relación a las fuerzas motoras o que propenden al movimiento; Se conoce que un valor igual a uno indica un estado de equilibrio límite.

Este método tiene la virtud de definir múltiples posibilidades de movimiento de la cuña, entre ellas el deslizamiento a través de cualquiera de los dos planos delimitantes o a través de la intersección formada por dichos planos.

A) EL MÉTODO POR ANÁLISIS VECTORIAL

Una vez delimitados los planos que forman la cuña en estudio, el método se basa en encontrar los vectores que representan a cada plano y a la intersección formada por estos. Conociendo el peso de la cuña y las fuerzas estáticas externas que actúan sobre ella (presión de poro, cargas muertas, etc.), se halla el vector de la resultante de fuerzas, el cual se proyecta en cada uno de los vectores previamente encontrados. El valor numérico de la proyección correspondiente indicará si la cuña tiende a deslizarse por cualquier de los dos planos o a través de la intersección formada por ambos.

Las posibilidades reales de movimiento de la cuña estarán definidas por el valor del factor de seguridad. Un valor inferior a uno indicará que la cuña es inestable bajo las condiciones supuestas o propuestas.

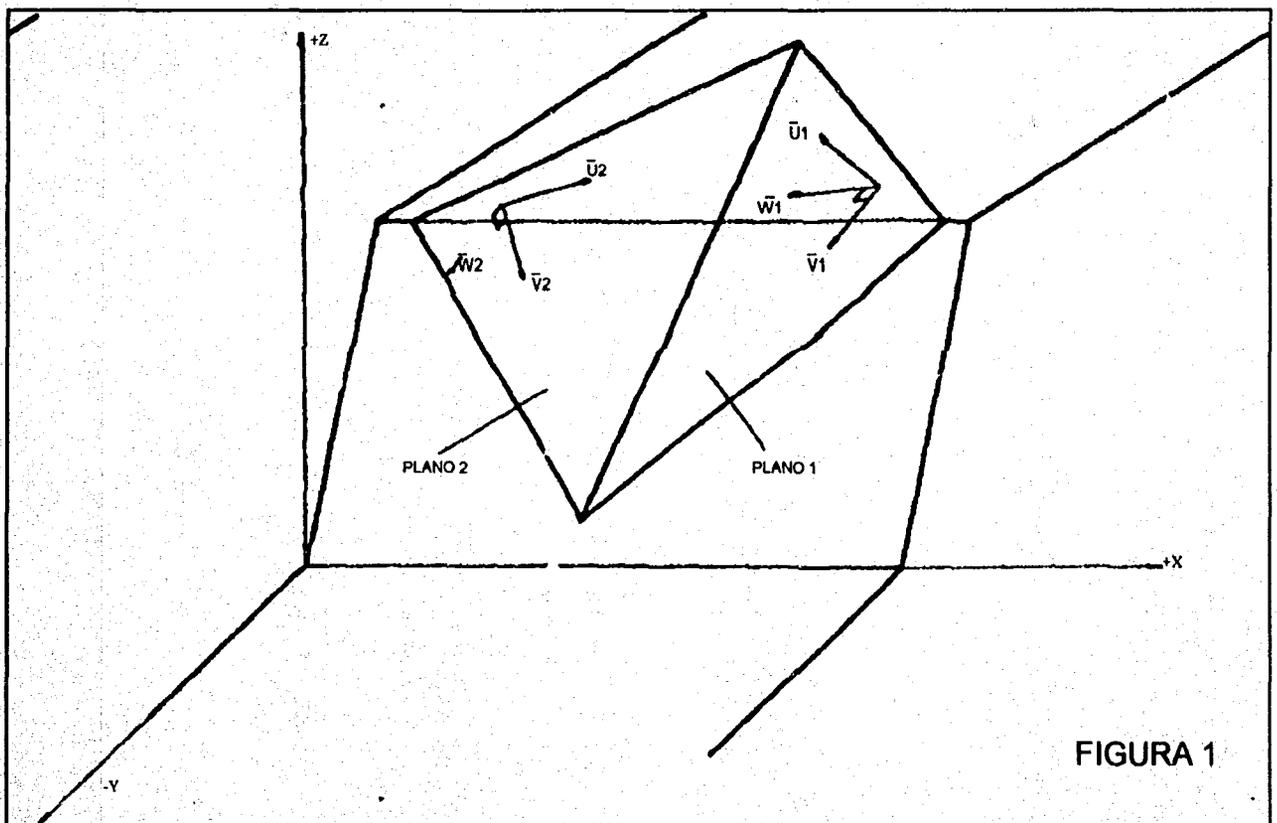


FIGURA 1

Procedimiento

Se emplea un sistema de referencia convencional formado por tres ejes ortogonales x , y y z , donde el eje x es paralelo al rumbo del talud, de signo positivo y dirigido hacia la derecha; el eje y con dirección hacia afuera del talud y signo negativo y el eje z dirigido hacia arriba, vertical y de signo positivo (figura 1).

Con base en el sistema de referencia descrito, se determinan los vectores unitarios que son paralelos al rumbo y al echado de cada plano (figura 1):

\bar{U}_1 = Vector unitario paralelo al rumbo del Plano 1.

\bar{U}_2 = Vector unitario paralelo al rumbo del Plano 2.

\bar{V}_1 = Vector unitario paralelo al echado del Plano 1.

\bar{V}_2 = Vector unitario paralelo al echado del Plano 2.

Para hallar a cada vector unitario se utilizan los cósenos directores:

$$D_1 = (\cos \beta_1, \sin \beta_1, 0);$$

$$D_2 = (\cos \beta_2, \sin \beta_2, 0);$$

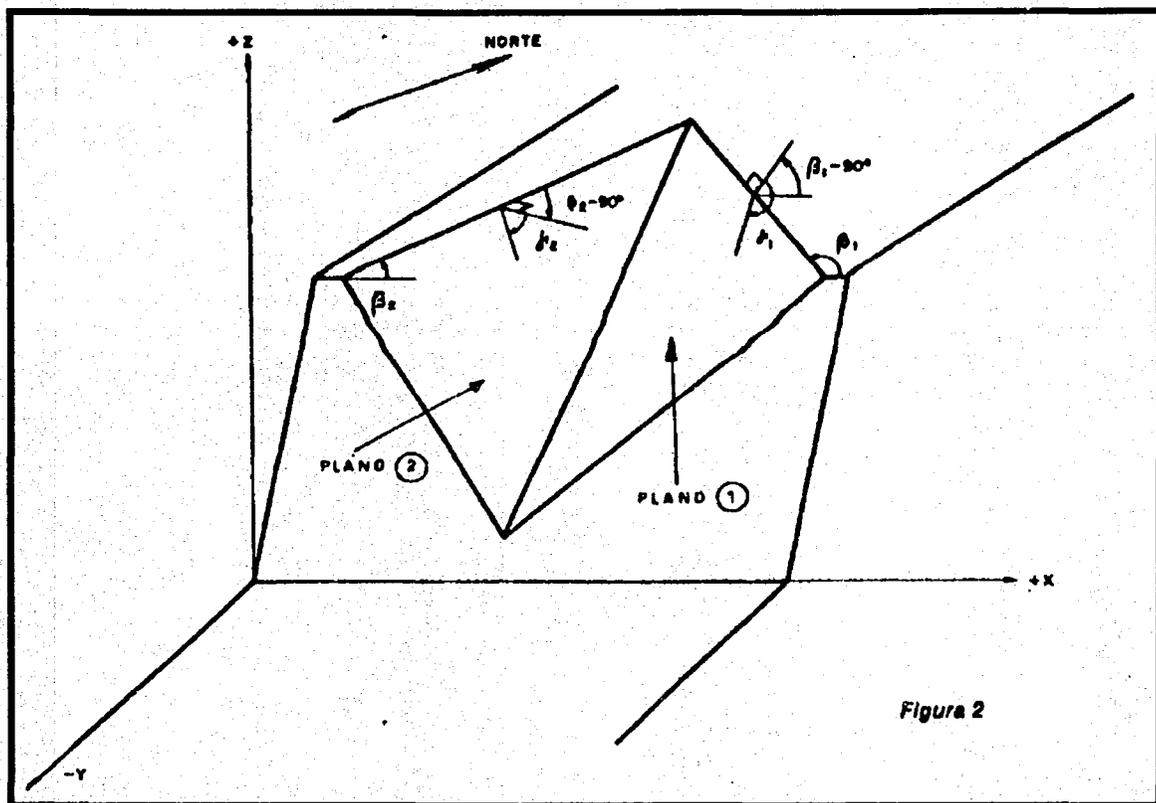


Figura 2

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= (\cos \gamma_1 \operatorname{sen} \beta_1, -\cos \gamma_1 \cos \beta_1, -\operatorname{sen} \gamma_1) \\ \bar{V}_2 &= (\cos \gamma_2 \operatorname{sen} \beta_2, -\cos \gamma_2 \cos \beta_2, -\operatorname{sen} \gamma_2) \end{aligned}$$

Los ángulos β_1 y β_2 se determinan en sentido contrario a las manecillas del reloj desde el eje "X" hasta encontrar el rumbo de cada plano (figura 2).

Los ángulos γ_1 y γ_2 se determinan sobre el plano vertical imaginario que se genera en la posición $\beta_1 - 90^\circ$ o $\beta_2 - 90^\circ$ midiéndolos abajo desde la horizontal hasta hallar el Plano 1 o 2, según sea el rango (figura 2).

Hallados los vectores unitarios \bar{U}_1 , \bar{V}_1 y \bar{U}_2 , \bar{V}_2 se realizan los siguientes productos cruz y se obtienen ahora otros vectores (figura 3):

$\vec{w}_1 = \vec{u}_1 \times \vec{v}_2$ Vector perpendicular al Plano 1.

$\vec{w}_2 = \vec{u}_2 \times \vec{v}_2$ Vector perpendicular al Plano 2.

$\vec{x}_{12} = \vec{w}_1 \times \vec{w}_2$ Vector paralelo a la línea de intersección entre los planos 1 y 2

$\vec{s}_{12} = \vec{x}_{12} \times \vec{w}_1$ Vector sobre el plano 1 perpendicular a \vec{x}_{12} .

$\vec{s}_{12} = \vec{x}_{12} \times \vec{w}_2$ Vector sobre el plano 2 perpendicular a \vec{x}_{12} .

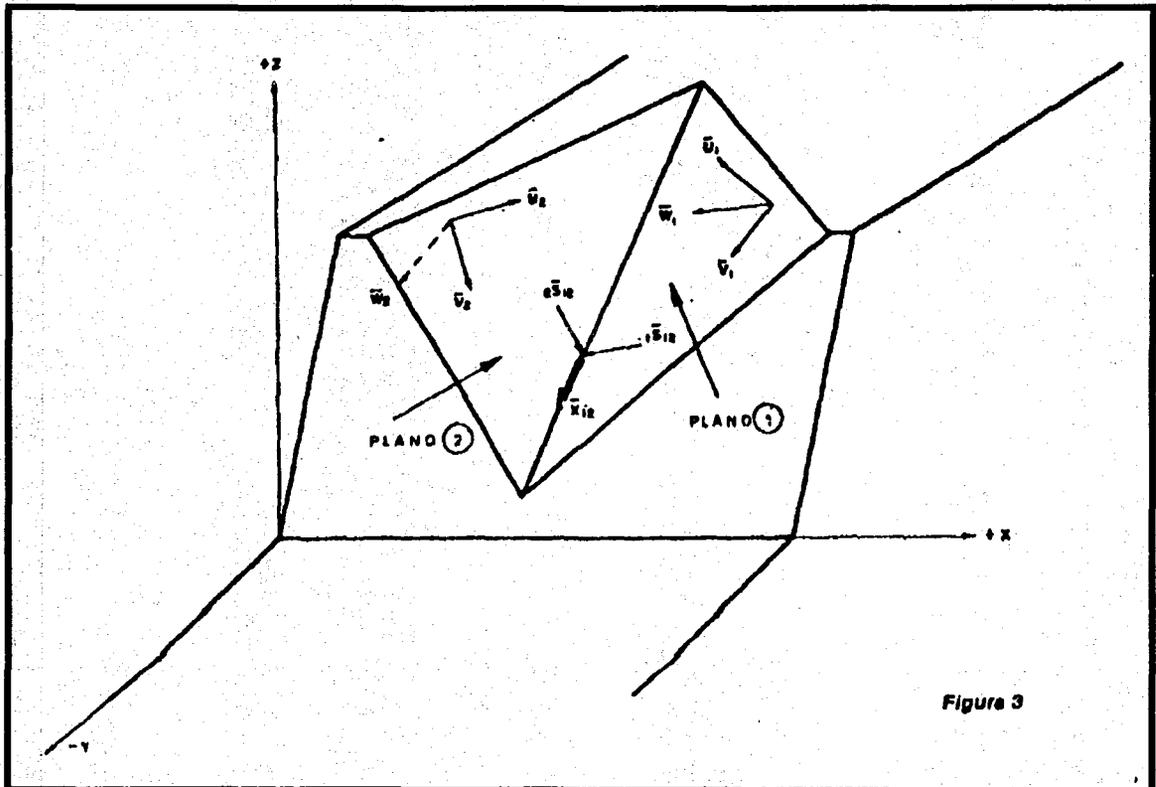


Figure 3

B) ANALISIS TRIDIMENSIONAL DE TALUDES EN ROCA MEDIANTE OPERACIONES VECTORIALES

1. Definición de planos de debilidad mediante vectores unitarios.

El rumbo de un plano de debilidad esta dado por el ángulo β , medido sobre un plano horizontal en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj a partir del eje X positivo. β puede tomar valores entre 0° y 180° . El echado del plano (ángulo con respecto a la horizontal), esta dado por el ángulo γ y se mide en dirección ortogonal (90°) con respecto al rumbo. El valor de γ puede valer entre 0° y 180° y se mide con respecto a la horizontal X hacia abajo en dirección $\beta-90^\circ$.

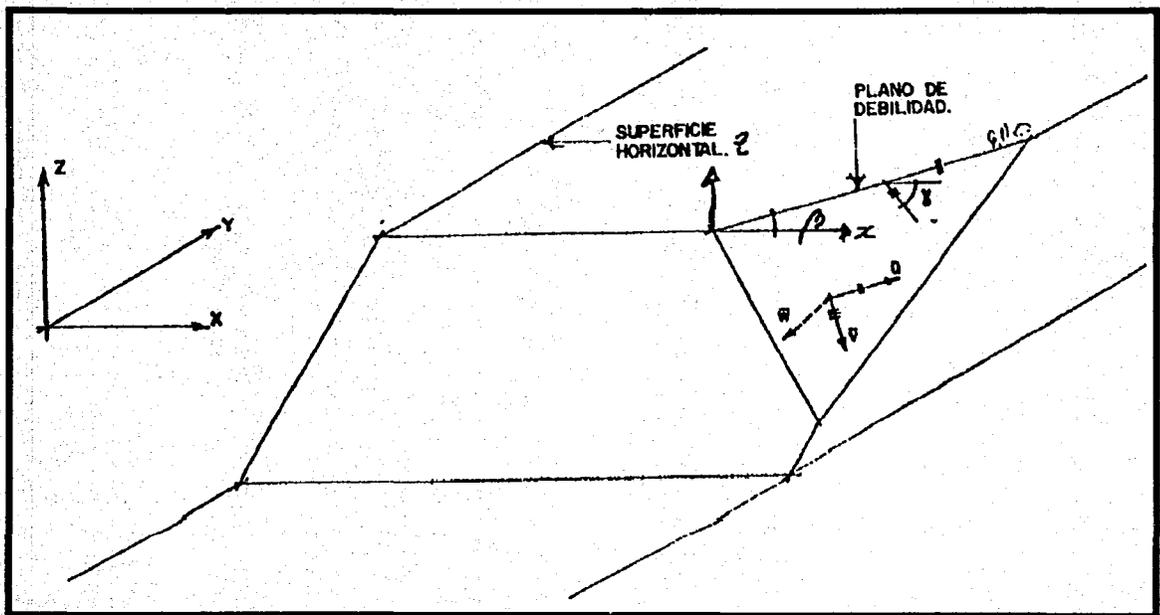


figura 1

Los ángulos β y γ nos permitirán definir dos vectores unitarios \bar{u} y \bar{v} para describir el rumbo y el echado respectivamente \bar{u} y \bar{v} se localizan en el plano de discontinuidad(figura 1), así Pues

$$\bar{u} = \cos \beta \bar{i} + \sin \beta \bar{j}$$

$$\bar{v} = \cos \gamma \sin \beta \bar{i} - \cos \gamma \cos \beta \bar{j} - \sin \gamma \bar{k}$$

O bien

$$\bar{u} = (\cos \beta, \sin \beta, 0)$$

$$\bar{v} = (\cos \gamma \sin \beta, -\cos \gamma \cos \beta, -\sin \gamma)$$

puesto que el rumbo y el echado están a 90° el producto escalar (punto) $\bar{u} \cdot \bar{v} = 0$

Por otra parte el producto cruz de \bar{u} y \bar{v} nos da otro vector unitario \bar{w} el cual es perpendicular a u y a v y por tanto, al plano descrito por u y v .

El vector \bar{w} se obtiene desarrollando el producto cruz siguiente.

$$\bar{w} = \bar{u} \times \bar{v} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}$$

La dirección de \bar{w} es perpendicular al plano de \bar{u} y \bar{v} y su sentido esta dado por el avance de un tornillo de cuerda derecha al girar \bar{u} hacia \bar{v} a través del ángulo menor entre ellos ($< 180^\circ$).

2. Fuerzas.

La componente de una fuerza \bar{R} en la dirección de un vector unitario \bar{n} esta dada por

$$\bar{R} \cdot \bar{n} = R \cos \theta$$

donde θ es el ángulo entre \bar{R} y \bar{n} . Así pues la componente normal a un plano de una fuerza R

$$R_N = \bar{R} \cdot \bar{\omega} = R_x \omega_x + R_y \omega_y + R_z \omega_z$$

Similarmente, la componente de \bar{R} en la dirección de la línea de intersección de dos planos es:

$$R \frac{\bar{X}_{12}}{X_{12}}$$

Llamemos ϕ' al ángulo que forma una fuerza \bar{R} normal de un plano, \bar{w} (figura 2)

$$\tan \phi' = \frac{R_T}{R_N}$$

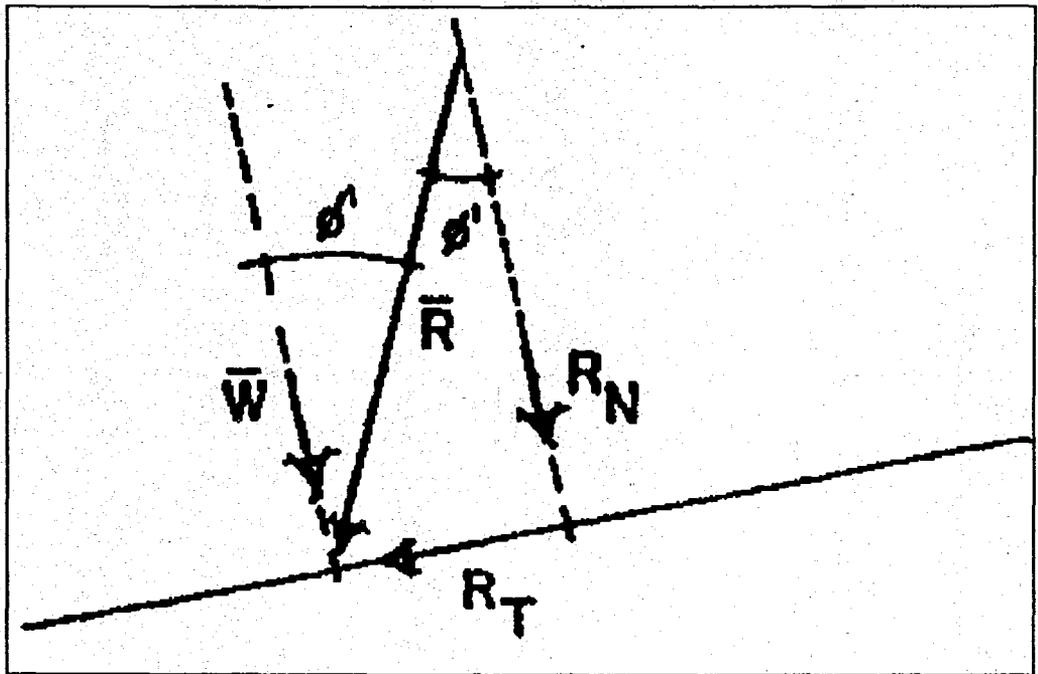


figura 2

donde R_N y R_T son las componentes normal tangencial al plano respectivamente.

Obsérvese que:

$$R_N = \bar{R} \cdot \bar{\omega} = R_x \omega_x + R_y \omega_y + R_z \omega_z = R \cos \phi'$$

y

$$R_T = \left| \bar{R} \times \bar{\omega} \right| = R \text{ Sen } \phi'$$

$$= \left\{ (R_y \omega_z - R_z \omega_y)^2 + (R_z \omega_x - R_x \omega_z)^2 + (R_x \omega_y - R_y \omega_x)^2 \right\}^{1/2}$$

así pues

$$\text{Tan } \phi' = \frac{R_T}{R_N} = \frac{\left\{ (R_y \omega_z - R_z \omega_y)^2 + (R_z \omega_x - R_x \omega_z)^2 + (R_x \omega_y - R_y \omega_x)^2 \right\}^{1/2}}{(R_x \omega_x + R_y \omega_y + R_z \omega_z)}$$

El vector \bar{R}_T puede también calcularse: $\bar{R} - R_N \bar{\omega}$

$$\bar{R}_T = (R_x - R_N \omega_x) \bar{i} + (R_y - R_N \omega_y) \bar{j} + (R_z - R_N \omega_z) \bar{k}$$

puesto que: $R_N \bar{\omega} = R_N \omega_x \bar{i} + R_N \omega_y \bar{j} + R_N \omega_z \bar{k}$

$$\text{Tan } \phi' = \frac{\{(R_x - R_N \omega_x)^2 + (R_y - R_N \omega_y)^2 + (R_z - R_N \omega_z)^2\}^{1/2}}{R_x \omega_x + R_y \omega_y + R_z \omega_z}$$

3. Análisis de Estabilidad para deslizamiento sobre un plano.

Cálculo del factor de seguridad.

a) Cargas estáticas.

El caso más simple que se presenta cuando el rumbo de un plano de debilidad es paralelo al rumbo del talud. (figura 3) En tales condiciones se pueden definir \bar{u} y \bar{v} como sigue:

$$\bar{u} = (u_x, u_y, u_z) = (1, 0, 0)$$

$$\bar{v} = (v_x, v_y, v_z) = (0, v_y, v_z)$$

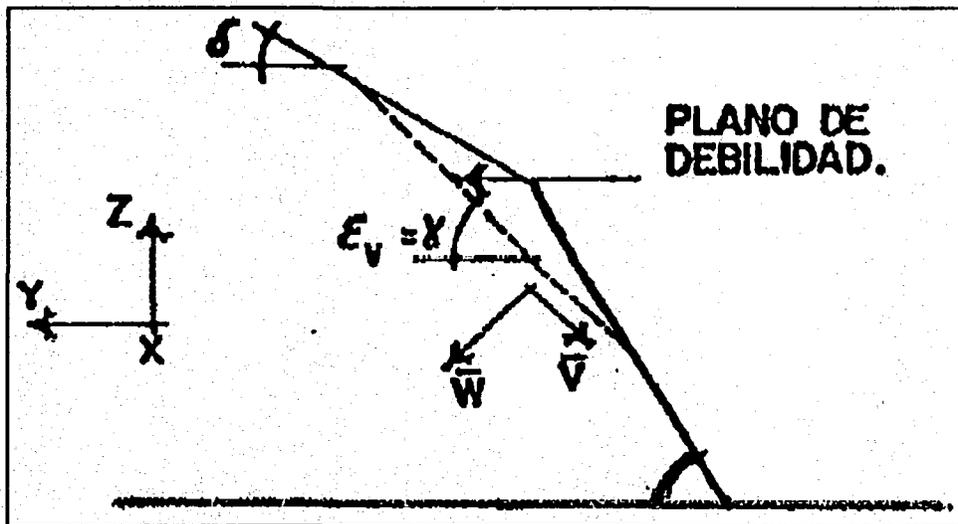
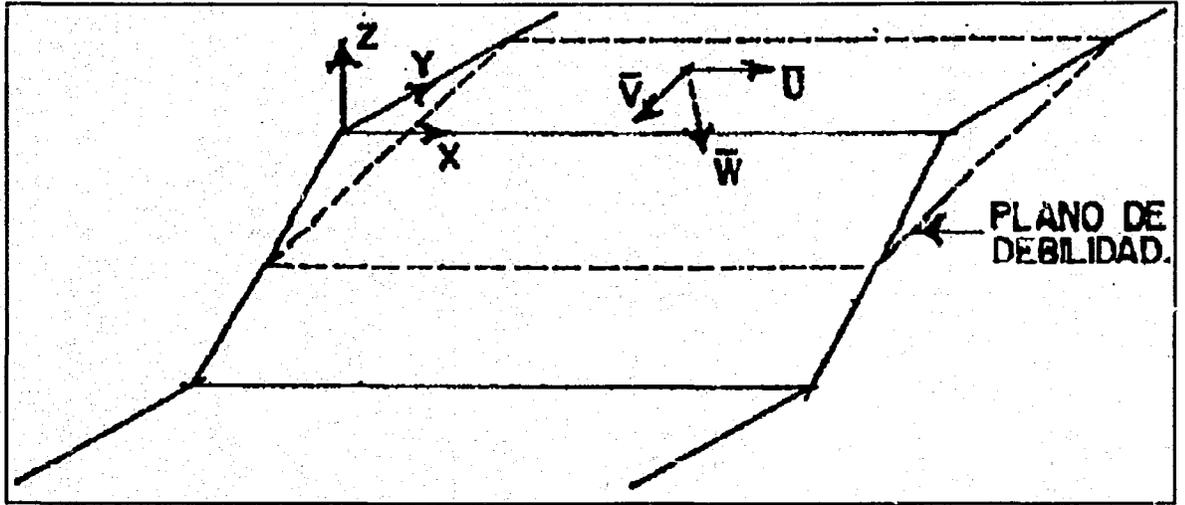


figura 3

para que el deslizamiento sea cinemáticamente posible:

ϵ_v debe ser menor que α si $0 < \alpha < \pi$
 y si $\alpha = \pi$; ϵ_v debe ser menor que δ

Para una cuña de roca sometida solo a la acción de su peso propio, \bar{W} y un plano de debilidad paralelo al talud, el deslizamiento ocurrirá paralelo a \bar{v} , en dirección del echado.

La magnitud de la componente T del peso \bar{W} actuando paralela a \bar{v} puede obtenerse:

$$T = \bar{W} \cdot \bar{v}$$

donde $\bar{W} = (0, 0, -W)$; el vector \bar{T} estará dado por $T = \bar{T} \cdot \bar{v}$

La magnitud de la componente de \bar{W} , normal a la dirección del deslizamiento es:

$$N = \bar{W} \cdot \bar{w}$$

donde \bar{w} es un vector unitario normal al plano de deslizamiento dado por $\bar{u} \times \bar{v}$.

La magnitud de la fuerza resistente disponible esta dada por:

$$N \tan \phi$$

donde ϕ es el ángulo de resistencia al corte entre las superficies del plano de deslizamiento. El factor de seguridad contra el deslizamiento esta dado por el cociente de la fuerza resistente y la fuerza motora T.

$$F. S. = \frac{N \tan \phi}{T} = \frac{(\bar{W} \cdot \bar{w}) \tan \phi}{(\bar{W} \cdot \bar{v})}$$

En este caso sencillo

$$\bar{w} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & v_y & v_z \end{vmatrix} = -\bar{j}v_z + \bar{k}v_y$$

de donde $N = \bar{W} \cdot \bar{w} = -Wv_y$

recordando que $\bar{W} = (0, 0, -W)$

y $T = \bar{W} \cdot \bar{v} = -Wv_z$

por lo que:

$$F.S. = -\frac{Wv_y \tan\phi}{-Wv_z} = \frac{v_y}{v_z} \tan\phi$$

recordando que $\tan\gamma = \frac{v_z}{v_y} \therefore \frac{1}{\tan\gamma} = \frac{v_y}{v_z}$

$F.S. = \frac{\tan\phi}{\tan\gamma}$

Válida cuando la cuña solo esta sometida a la acción de su propio peso

b) cargas dinámicas.

Las cargas sísmicas con una carga horizontal, H, paralela a la proyección horizontal del vector unitario del echado, \bar{v} .

Así pues, la resultante de fuerzas actuantes sobre la cuña queda:

$$\bar{R} = \bar{W} + \bar{U} + \bar{Q} + \bar{H} \dots \dots \dots (1)$$

donde \bar{H} vale

$$\bar{H} = \bar{i} \left(\frac{v_x}{(v_x^2 + v_y^2)^{1/2}} \right) K_1 W + \bar{j} \left(\frac{v_y}{(v_x^2 + v_y^2)^{1/2}} \right) K_1 W \dots \dots \dots (2)$$

K1 es el coeficiente sísmico y toma valores entre 0 y 0.3 dependiendo de la intensidad del movimiento sísmico esperado.

El factor de seguridad queda dado por las dos expresiones anteriores (1) y (2) por lo tanto:

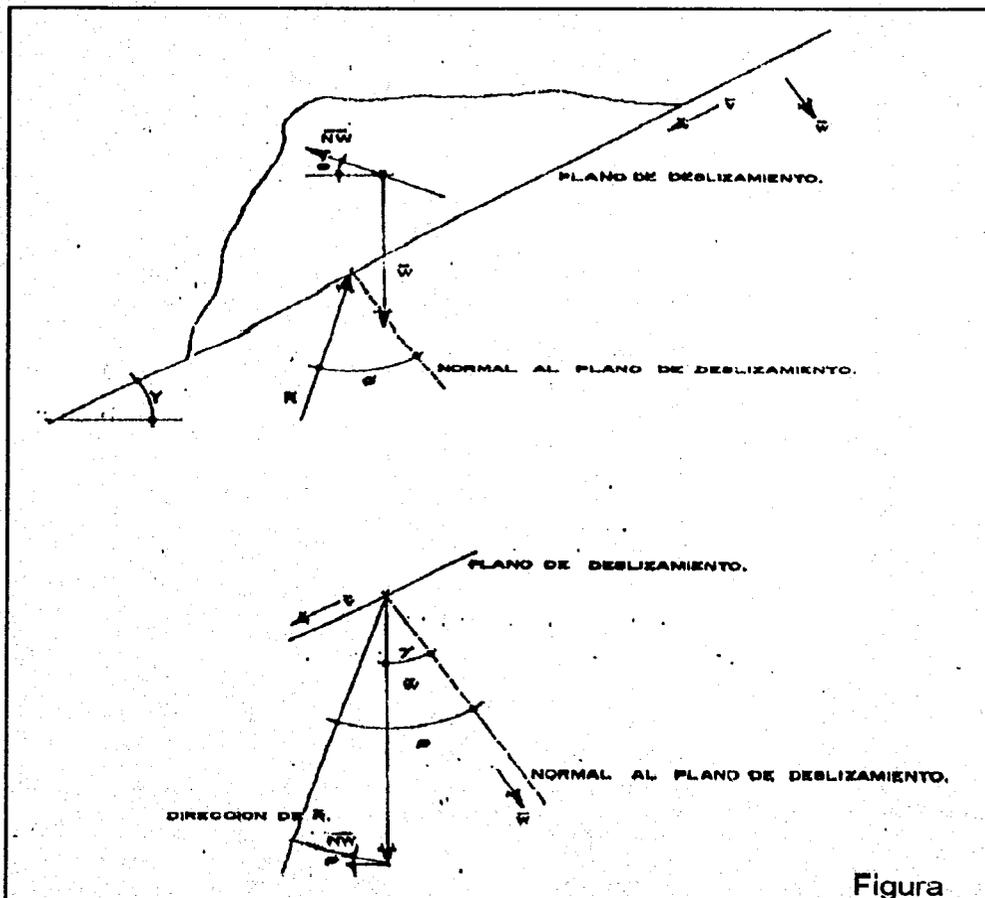
$$F.S. = \frac{\text{Tan}\phi}{\text{Tan}\phi'}$$

La resistencia dinámica es la resistencia disponible en exceso de la resistencia requerida para la estabilidad estática ϕ .

La resistencia dinámica se denota por \overline{NW} donde \overline{W} es el peso de la cuña analizada y N es un coeficiente que se determina de la siguiente manera:

La fuerza \overline{NW} es una fuerza tal que aplicada sobre la cuña, potencialmente deslizante, la conduce a una situación de estabilidad crítica (F.S. = 1). Dependiendo de la dirección en la cual \overline{NW} actúe, su magnitud variará.

La magnitud de \overline{NW} apropiada para el diseño o análisis de taludes es la magnitud de \overline{NW} aplicada en cierta dirección tal que \overline{NW} sea mínima.



Figura

Para un bloque deslizando sobre un plano, como el mostrado en la figura 4 \overline{NW} debe aplicarse en una dirección ϕ , con respecto a la horizontal, lo cual nos dará el mínimo valor de \overline{NW} y que causara que el bloque comience a deslizar ($F.S.=1$).

La magnitud y dirección de \overline{NW} puede determinarse como se muestra en la fig. 4. Dado que la magnitud y dirección de \overline{W} es conocida y la dirección de la resultante R es ϕ grados con respecto a la normal, al plano de deslizamiento cuando el deslizamiento comienza, la magnitud del vector \overline{NW} es mínima cuando se une el extremo del vector \overline{W} con la línea de acción de la resultante R , formando 90° con esta última. Así pues, la mínima magnitud de \overline{NW} está dada por:

$$\overline{NW} = W \text{ Sen } (\phi - \gamma)$$

$$N = \text{Sen } (\phi - \gamma)$$

donde ϕ es el ángulo de resistencia al corte y γ el echado. Así pues, el mínimo valor de N ocurre cuando \overline{NW} actúa en la misma dirección de la proyección horizontal del echado pero inclinado hacia arriba de la horizontal un ángulo $\theta = (\phi - \gamma)$

Las cargas que en general actúan sobre una cuña son:

- ❖ Peso propio de la masa deslizando, \overline{W}
- ❖ Cargas vivas \overline{Q} aplicadas en cualquier punto
- ❖ Subpresión en los planos 1 y 2, \overline{U}_1 y \overline{U}_2
- ❖ Cargas dinámicas inducidas por sismo o detonaciones \overline{H}

La resultante de las cargas \overline{R} es la suma de todas ellas.

c) Determinación de los modos de falla (Deslizamiento).

1) La cuña de roca pierde el contacto con los planos de deslizamiento (se bota), generalmente por subpresión.

Considere la cuña de roca OBCD, fig. 5. La resultante \overline{R} tiende a romper el contacto entre el tetraedro (cuña) y los planos 1 y 2 respectivamente si

$$\overline{R} \cdot \overline{\omega}_1 < 0$$

$$\overline{R} \cdot \overline{\omega}_2 > 0$$

Analizando la primera de las desigualdades anteriores, es fácil ver que si la proyección de la resultante R en dirección de la normal al plano 1, w_1 resulta negativa, dicha proyección tiene sentido contrario a w_1 por lo que la cuña tiende a perder el contacto con el plano 1, ya que w_1 tiene sentido hacia abajo de dicho plano. Así mismo si en la segunda desigualdad, el producto punto $R \cdot w_2$ resulta positivo, significa que la proyección de la resultante R en dirección normal al plano 2 tiene el sentido de w_2 por lo que la cuña también tiende a desprenderse del plano 2.

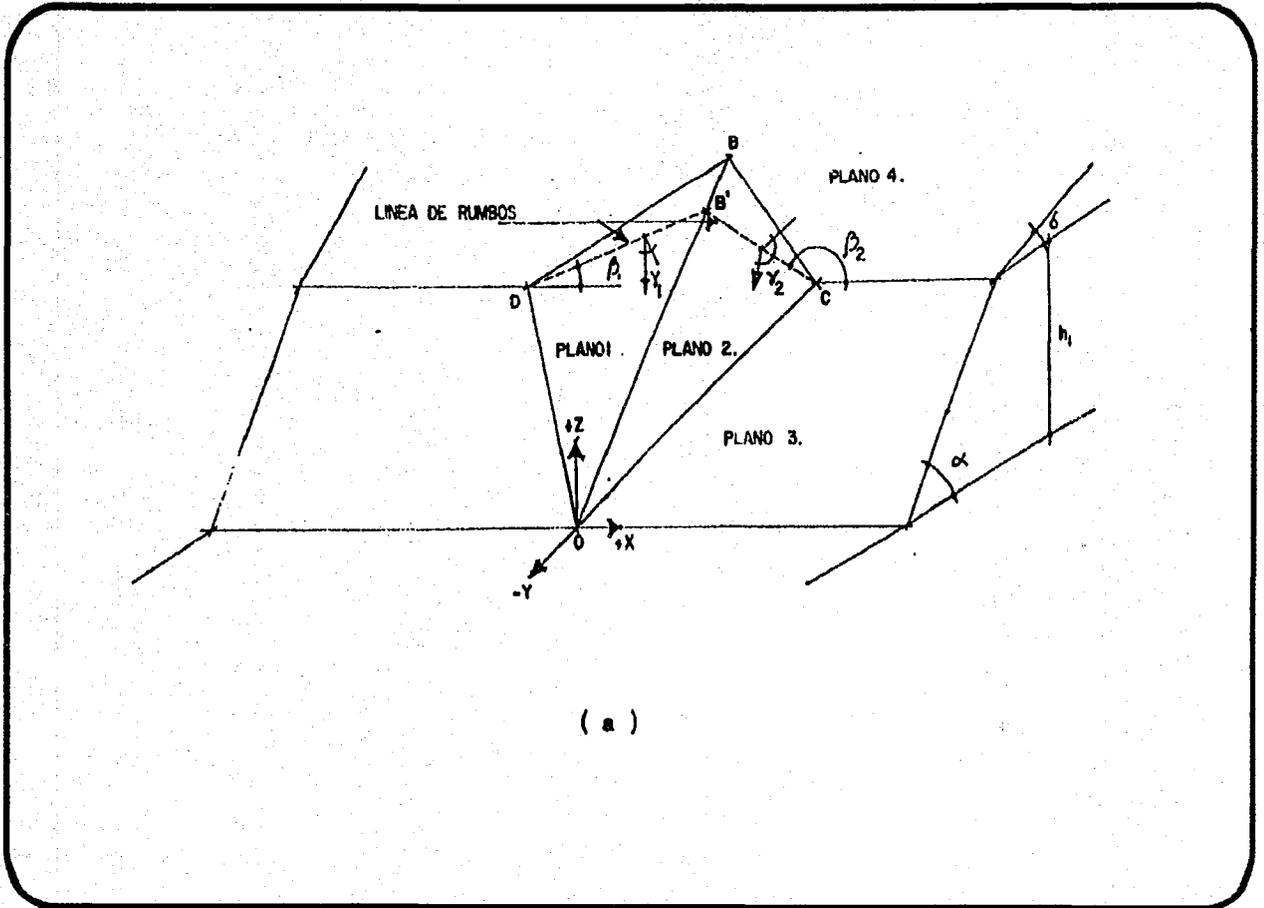


figura 5

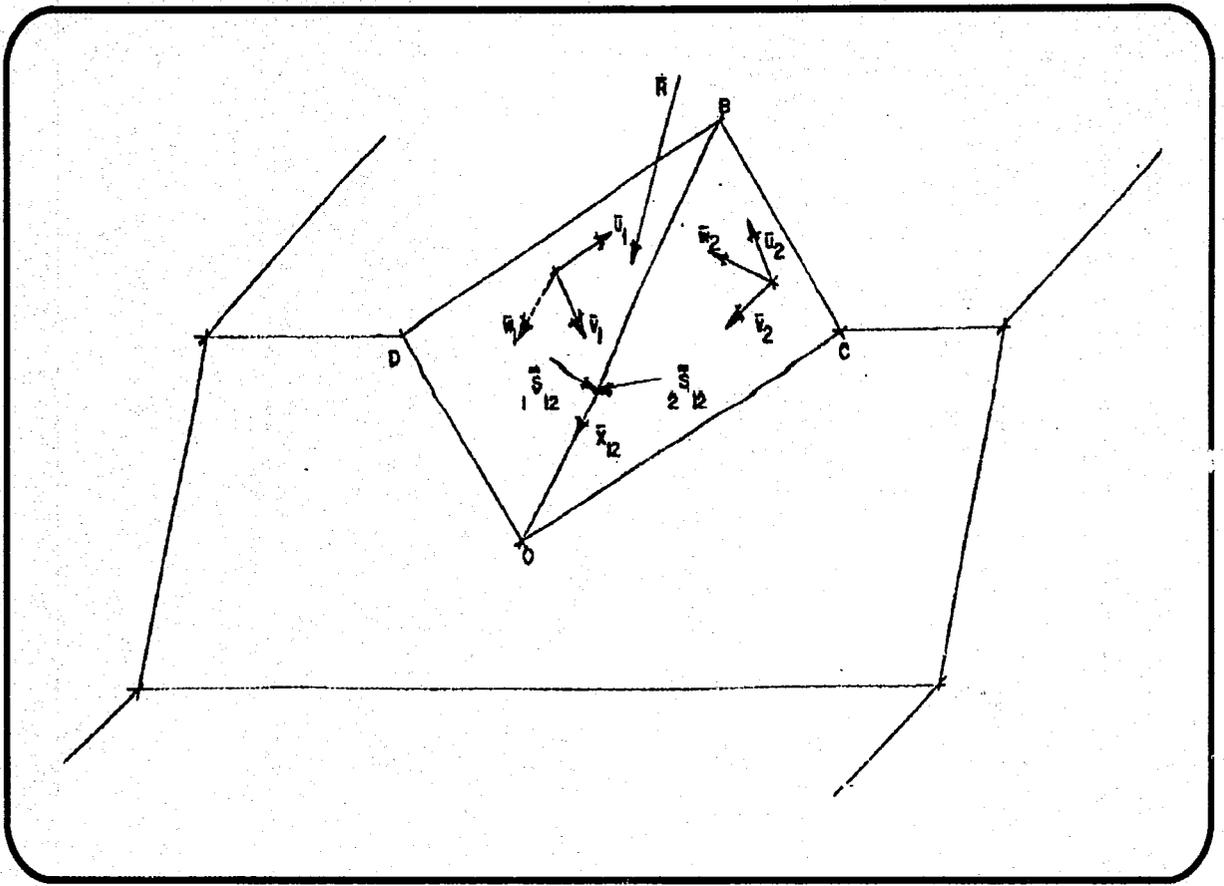


fig. 6

Las desigualdades anteriores pueden cumplirse: una o la otra o ambas simultáneamente.

Cuando las desigualdades anteriores se cumplen, el equilibrio no es posible a menos que las juntas soporten tensión o que se proporcione un anclaje adecuado que la soporte. Desde luego, lo más recomendable es proporcionar al drenaje adecuado para evitar subpresiones que despeguen la cuña de los planos.

si:

$$\begin{aligned} \bar{R} \cdot \bar{\omega}_1 &> 0 \\ \bar{R} \cdot \bar{\omega}_2 &< 0 \end{aligned}$$

La cuña se mantiene en contacto con los planos 1 y 2.

d) Con el objeto de definir si la cuña desliza solo sobre el plano 1 ó solo sobre el plano 2 ó por la intersección de ambos planos definiremos los vectores siguientes:

$$1. \bar{S}_{12} = \bar{X}_{12} \times \bar{\omega}_1$$

$$2. \bar{S}_{12} = \bar{X}_{12} \times \bar{\omega}_2$$

recuérdese que $\bar{X}_{12} = \bar{\omega}_2 \times \bar{\omega}_1$

Como se ve en la fig. anterior $1\bar{S}_{12}$ es un vector en el plano 1 y perpendicular a la línea de intersección \bar{X}_{12} y $2\bar{S}_{12}$ es un vector en el plano 2 perpendicular a la línea de intersección \bar{X}_{12}

El deslizamiento ocurrirá por la línea de intersección si se satisfacen simultáneamente las siguientes desigualdades:

$$\bar{R} \cdot 1\bar{S}_{12} > 0$$

$$\bar{R} \cdot 2\bar{S}_{12} > 0$$

$$\epsilon \times \leq \alpha \text{ si } 0 < \alpha < \pi \quad \text{y} \quad \epsilon \times < \delta \text{ si } \alpha = \pi$$

$$\text{donde } \epsilon \times = \tan^{-1} \left(\frac{X_{12z}}{X_{12y}} \right)$$

\bar{X}_{12z} y \bar{X}_{12y} son las componentes z y x del vector \bar{X}_{12} si $\bar{R} \cdot 2\bar{S}_{12} > 0$, significa que la resultante \bar{R} tiene componentes sobre el plano 1 y con dirección (90°) hacia la línea de intersección. Si $\bar{R} \cdot 2\bar{S}_{12} > 0$, la \bar{R} tiene componentes sobre el plano 2 y en dirección perpendicular a la línea de intersección.

Las desigualdades de $\epsilon \times$, α y α , determinan si la cuña tiene salida al exterior del talud.

Para que el deslizamiento ocurra solo sobre el plano 1 deben satisfacerse las siguientes desigualdades

$$\bar{R} \cdot \bar{\omega}_1 > 0 \Rightarrow (\text{garantiza el contacto entre la cuña y el plano 1})$$

$$\bar{R} \cdot 1\bar{S}_{12} < 0 \Rightarrow (\text{no tiende a la intersección})$$

Para que el deslizamiento ocurra solo sobre el plano 2 deben satisfacerse

$\bar{R} \cdot \bar{\omega}_2 < 0 \Rightarrow$ (garantiza el contacto entre cuña y planos)

$\bar{R} \cdot \bar{s}_{12} < 0 \Rightarrow$ (no tiende a irse hacia la intersección)

e) Cálculo del factor de seguridad.

Una vez que se determina el modo de deslizamiento procederemos a estimar el factor de seguridad.

Si el deslizamiento ocurre solo sobre el plano 1 ó solo sobre el 2 el F.S. se calcula solo sobre un plano.

Plano 1

$$F.S. = \frac{N_1 \tan \phi_1}{T_1} = \frac{(\bar{R} \cdot \bar{\omega}_1) \tan \phi_1}{T_1}$$

$$\bar{T}_1 = \bar{R} - (\bar{R} \cdot \bar{\omega}_1) \bar{\omega}_1 = T_{1x} \bar{i} + T_{1y} \bar{j} + T_{1z} \bar{k}$$

$$F.S. = \frac{(\bar{R} \cdot \bar{\omega}_1) \tan \phi_1}{(T_{1x}^2 + T_{1y}^2 + T_{1z}^2)^{1/2}}$$

que puede escribirse

$$F.S. = \frac{\tan \phi_1 (R_x \omega_{1x} + R_y \omega_{1y} + R_z \omega_{1z})}{((R_y \omega_{1z} - R_z \omega_{1y})^2 + (R_z \omega_{1x} - R_x \omega_{1z})^2 + (R_x \omega_{1y} - R_y \omega_{1x})^2)^{1/2}}$$

Para el plano 2

$$F.S. = \frac{N_2 \tan \phi_2}{T_2} = \frac{-(\bar{R} \cdot \bar{\omega}_2) \tan \phi_2}{T_2}$$

el signo (-) se debe a la dirección del vector unitario normal $\bar{\omega}_2$

$$F.S. = \frac{\tan \phi_2 (-R_x \omega_{2x} - R_y \omega_{2y} - R_z \omega_{2z})}{((R_y \omega_{2z} - R_z \omega_{2y})^2 + (R_z \omega_{2x} - R_x \omega_{2z})^2 + (R_x \omega_{2y} - R_y \omega_{2x})^2)^{1/2}}$$

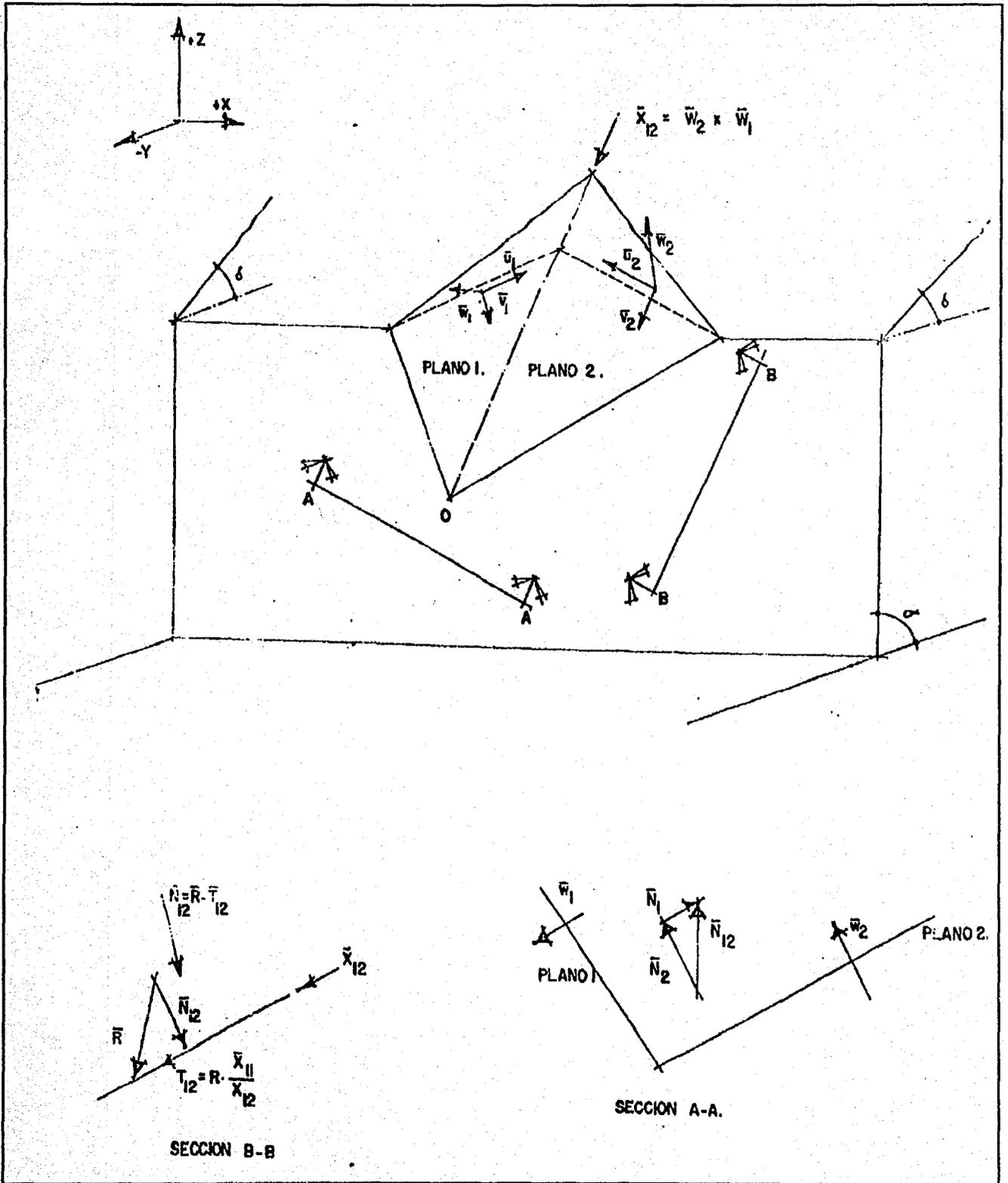


fig. 7

El vector \bar{T}_{12} en dirección de \bar{X}_{12} es:

$$\bar{T}_{12} = \frac{T_{12} \bar{X}_{12}}{X_{12}}$$

Es conveniente definir el vector \bar{N}_{12} , normal a la línea de intersección

$$\bar{N}_{12} = \bar{R} - \bar{T}_{12}$$

para evaluar la resistencia por fricción sobre los planos 1 y 2 es necesario determinar las componentes N_1 y N_2 de \bar{N}_{12} actuantes sobre los planos 1 y 2 normalmente. fig. 7

$$N_1 \bar{\omega}_1 + N_2 (-\bar{\omega}_2) = \bar{N}_{12}$$

donde N_1 y N_2 representan las magnitudes de N_1 y N_2 respectivamente.

así pues

$$N_1 \omega_{1x} - N_2 \omega_{2x} = N_{12x}$$

$$N_1 \omega_{1y} - N_2 \omega_{2y} = N_{12y}$$

$$N_1 \omega_{1z} - N_2 \omega_{2z} = N_{12z}$$

Una vez determinados N_1 y N_2

$$F S = \frac{N_1 \tan \phi_1 + N_2 \tan \phi_2}{T_{12}}$$

CONCLUSIONES

Se considera que son necesarias técnicas y metodologías en la aplicación de la estabilidad de taludes, las cuales se deberán producirse con base a la experiencia y en el conocimiento del comportamiento de las obras a realizar, que conducirán a clarificar los parámetros que definen dicho comportamiento y el grado que cada uno de ellos que participan en el.

Se considera que la cada vez mas intensiva instrumentación para la medición del comportamiento de obras a dado lugar a mejorar las tecnologías y metodologías de diseño que actualmente son utilizadas.

La instrumentación a largo plazo permitirá conocer el comportamiento de las estructuras así como para poder mejorar los procedimientos de diseño y en algunos casos tomar decisiones en la vida útil de la misma o bien para evitar el peligro de falla o para prever el mantenimiento que requieren todas las obras civiles.

Asimismo las mediciones de campo permitirán tomar decisiones con bastante seguridad sobre el procedimiento de construcción o diseño con el fin de evaluar su seguridad.

Puesto que la estabilidad de los taludes rocosos esta muy influida por su carácter discontinuo y por la estructura del material hay que tomar con muchas reservas los valores de los ángulos del talud estable o inestable.

El grado de habilidad ingenieril que se necesita para resolver los problemas depende en gran parte de la naturaleza del terreno, para resolver con eficacia dichos problemas se deben de poseer la mas alta capacidad.

Esto se debe en parte a la infinita variedad de combinaciones de materiales que constituyen al subsuelo y condiciones hidráulicas que puedan dar origen al peligro

de deslizamiento y en parte al hecho de que las consideraciones económicas exigen con frecuencia sacrificar en forma radical los coeficientes de seguridad.

El ingeniero debe también ser capaz de prever cuales son las peores dificultades constructivas que pueden presentarse en cada lugar y estimar los costos y plazos de construcción que corresponden en cada caso.

Si el terreno rocoso es desfavorable a primera instancia y no puede evitarse el ingeniero debe ejecutar sucesivamente las siguientes recomendaciones:

- ❖ Situar los lugares mas críticos, estudiarlos con muestradoras y ensayos in situ.
- ❖ Elegir los ángulos de los taludes en función de un balance razonable entre los requerimientos de la economía y los de seguridad.
- ❖ Proyectar los sistemas de drenaje en caso de ser necesarios.
- ❖ Preparar un programa de las observaciones que deberán efectuarse, durante su construcción para eliminar tanto las incognitas existentes sobre la naturaleza del lugar, así como las posibles incidencias de falla.
- ❖ Estabilizar con la mayor rapidez y el menor gasto aquellos taludes que empiezan a fallar, garantizando la estabilidad de los mismos.

El ingeniero debe fijar atención fundamentalmente en las condiciones generales de ejecución de los trabajos realizados en obra, ya que de estas condiciones, el proyecto de las obras y especialmente la concepción de la misma, para tener condiciones de estabilidad óptimas y la seguridad de las mismas.

A medida que pasa el tiempo, los taludes formados por la naturaleza en la roca, cualquiera que sea su calidad se achata, este proceso que no termina hasta que las pendientes adquieren inclinaciones que solo llegan a 15m. en horizontal por 1m. en vertical y aun menos. Este solo hecho indica que el producto de la descomposición de la roca se desplaza de manera mas o menos continua y descienden hacia el fondo de la pendiente donde se acumulan o son arrastrados por erosión.

Es muy raro que se produzcan deslizamientos que abarquen toda la longitud de un talud. Aun tratándose de taludes uniformes de gran longitud y de altura casi constante, los deslizamientos se producen generalmente en zonas aisladas separadas entre sí por una gran distancia.

Finalmente debe recordarse que el éxito del análisis de estabilidad de un talud rocoso depende de tener información confiable de los parámetros que intervienen en el problema y del criterio ingenieril con dichos parámetros que se apliquen.

Las investigaciones por desarrollar tanto en el campo experimental como teórico en el campo de la geotecnia son innumerables y el análisis del comportamiento de taludes naturales o creados por el hombre ha sido y seguirá siendo una herramienta de gran utilidad para impulsar diseños mas seguros y económicos.

BIBLIOGRAFIA

- Dunicliff John. "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley & Sons, 1988, New York, USA.
- Hanna T.H. "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering" Trans Tech Publications, 1985, Federal Republic of Germany.
- CFE. "Manual de Diseño de Obras Civiles", Geotecnia, B.2.5. Instrumentación en suelos, 1983, México.
- CFE "Manual de Diseño de Obras Civiles", Geotecnia, B.3.6. Instrumentación en mecánica de rocas, 1983, México.
- SRH-CFE-UNAM "comportamiento de Presas Construidas en México",
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 1976, México.
CFE "Comportamiento de Presas Construidas en México Vol 2 (1974-1984), Contribución al XV Congreso Internacional de Grandes Presas, CFE, 1985, México.
- Penman A.D.M., Technical Editor, "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering", Butterworths, 1973, England.
- Kovári K., Edítor, "Field Measurements in Geomechanics" A.A.Balkema, 1984, Zurich, Swiss.
- ASTM "Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics", Pub. No. 65-28198, 1965, Baltimore, USA.
- Kissam Philip, "Surveying for Civil Engineers", McGraw-Hill, 1979. New York, USA.
- González-Valencia F. and Montoya-Beltrán C. "Long-term stability of the Santa Rosa Dam left abutment", Proceedings First NARMS, 1994, Austin Texas, EUA.
- Herrera S. and Reséndiz D. "Agua Prieta Landslide: A Case History", Volumen Marsal, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., 1992, México.

-
- González Valencia F. y Herrera Castañeda S. "Inestabilidad de un talud natural en brechas volcánicas", Memorias IV Reunión Nacional de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. A.C., Taxco, 1993, México.
 - Gaziev E., Rechitski V., "Study of jointed slopes failure patterns on models", 2nd International Congress of the International Association of Engineering Geology (IAEG), V-22, Sao Paulo (Brasil), 1974 (a).
 - Gaziev E., Rechitski V., "Stability of stratified rock slopes", 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM), Denver (EUA), 1974 (b).
 - Gaziev E., Rechitski V., "Method of probabilistic analysis of rock slopes stability", 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM), Montreux (Suiza), 1979.
 - Gaziev E., "Estabilidad de los macizos rocosos y métodos de estabilización" D-21, Instituto de ingeniería, UNAM, 1984.
 - John K.W., "Graphical stability analysis of slopes in jointed rock" Proceedings of the ASCE SM2 1968. SM6 1969.
 - Londe P., Vigier G., Vormeringer R., "Stability of rock slopes, a tri-dimensional study", Proceedings of the ASCE. SMI, 1969.