



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN
MACIZOS ROCOSOS UTILIZANDO EL
METODO VECTORIAL"

T E S I S

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

ROBERTO ALFREDO MENDOZA SANCHEZ
VICTOR MANUEL VARGAS SALINAS

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA

MEXICO. D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-203/94

Señores
ROBERTO ALFREDO MENDOZA SANCHEZ
VICTOR MANUEL VARGAS SALINAS
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS
UTILIZANDO EL METODO VECTORIAL"**

- I. INTRODUCCION
- II. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD EN UN MACIZO ROCOSO POR EL METODO VECTORIAL
- III. EJEMPLOS NUMERICOS
- IV. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA PRACTICA DE LAS EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO
- V. CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 11 de enero de 1995.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por habernos dado los conocimientos y la formación profesional.

Al M.I. Agustín Demenegui Colina por el interés y dedicación que mostró en este trabajo.

**A mi familia, novia, y amigos por el apoyo que recibí de
ellos todo el tiempo.**

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS UTILIZANDO EL METODO VECTORIAL



INDICE

CAPITULO I. "INTRODUCCION"

I.1. GENERALIDADES.....	1
I.2. ALCANCE.....	2

CAPITULO II. "ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD EN UN MACIZO ROCOSO POR EL METODO VECTORIAL"..... 4

II.1. GENERALIDADES.....	4
II.2. CALCULO VECTORIAL PARA EL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE UN TALUD POR DESLIZAMIENTO DE UN PLANO.....	5
II.2.1. CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD ESTATICO.....	5
II.2.2. CALCULO DE LA RESISTENCIA DINAMICA.....	17
II.3. CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES QUE CONTIENEN DOS PLANOS DE FALLA POR EL ANALISIS VECTORIAL.....	21
II.3.1. CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA CARGAS ESTATICAS.....	21
II.3.1.1. DESCRIPCION GEOMETRICA Y CARGAS.....	21
II.3.1.2. DETERMINACION DEL MODO DE DESLIZAMIENTO PARA LA FALLA.....	26
II.3.1.3. CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR DESLIZAMIENTO.....	30
II.3.2. CALCULO DE LA RESISTENCIA DINAMICA EN CONTRA DEL DESLIZAMIENTO EN DOS PLANOS.....	35

CAPITULO III. "EJEMPLOS NUMERICOS"..... 38

III.1. EJEMPLOS DE PROBLEMAS DE DESLIZAMIENTO EN UN PLANO POR ANALISIS VECTORIAL.....	38
III.2. EJEMPLOS DE PROBLEMAS PARA DOS PLANOS DE FALLA TRABAJADOS POR ANALISIS VECTORIAL.....	49

CAPITULO IV. "ASPECTOS GENERALES SOBRE LA PRACTICA DE LAS EXCAVACIONES A CIELO
ABIERTO.".....62

CAPITULO V. "CONCLUSIONES Y COMENTARIOS".....76

BIBLIOGRAFIA.....79

DIRECTOR DE TESIS: M.I. AGUSTIN DEMEDRICH COLINA

IMPRESA Y DISEÑO: TALLERES SAHAGUNES S. DE CV

C A P Í T U L O I

INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

El objetivo de esta tesis es dar los elementos teóricos y prácticos de la mecánica de rocas aplicables a la estabilidad de taludes en macizos rocosos, como resultado de la ejecución de una obra de Ingeniería Civil.

El método para analizar la estabilidad de un talud en un macizo rocoso es diferente al que se emplea en los suelos, debido a que en la roca se presentan discontinuidades con una determinada orientación y resistencia al corte, ambas propiedades son las que determinan el equilibrio de la masa rocosa. Así, el método de análisis que se utilice debe tomar en cuenta la intersección tridimensional de las familias de juntas, como también de dichas discontinuidades con la cara del talud; de ahí la necesidad de utilizar el álgebra vectorial, ya que ésta es una herramienta que nos permite trabajar en un espacio de 3 dimensiones.

Las superficies de falla existen por la fracturación que presentan los macizos rocosos, por lo que la cinemática de deslizamiento tiene que ser verificada, delineando las

posibles direcciones y superficies en las cuales es posible el movimiento.

Después que se ha determinado la cuña de deslizamiento, el siguiente paso en el método de equilibrio es calcular la resistencia al corte requerida a lo largo de la superficie de falla, para conservar la masa en equilibrio. Una vez que la resistencia al corte requerida ha sido encontrada, esta es comparada con la resistencia al corte disponible.

Esta comparación es generalmente expresada en términos de un factor de seguridad, que debe ser definido muy cuidadosamente.

Finalmente, la superficie de deslizamiento crítica es la que da el factor de seguridad más bajo. En los suelos esto es usualmente un proceso iterativo, usando superficies de falla con la misma forma pero con diferentes medidas y orientaciones. Pero en el talud de roca puede haber varias cuñas de deslizamiento a considerar, cada una con diferente forma, controlada por varias intersecciones debido a las familias de las discontinuidades.

I.2 Alcance.

Los métodos de análisis estático y vectorial para cuñas de tres dimensiones están basados principalmente en los

trabajos de Wittke y Londe; las operaciones vectoriales usadas en cálculos de estabilidad de taludes pueden ser verificadas en cualquier libro de Álgebra Vectorial.

En el capítulo 2, varias combinaciones de los análisis vectoriales de Wittke y Londe son presentados para determinar el factor de seguridad estático en taludes de roca. Estos casos incluyen taludes con uno y dos planos de deslizamiento.

En el capítulo III se incluyen algunos problemas numéricos para determinar el factor de seguridad, además del método para calcular la resistencia dinámica en un talud en roca en tres dimensiones. El método de análisis dinámico dado por Newmark, nos dice que la resistencia dinámica puede ser usada para predecir desplazamientos en los macizos rocosos debido a movimientos sísmicos.

En el capítulo IV se exponen problemas prácticos resueltos en nuestro país, a través de un análisis vectorial, así como medidas de estabilización de masas rocosa.

Finalmente en el capítulo V se incluyen conclusiones y comentarios derivados de este trabajo.

C A P Í T U L O I I

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD EN UN
MACIZO ROCOSO POR EL MÉTODO VECTORIAL

II.1 GENERALIDADES.

En este capítulo se presentan métodos analíticos para determinar el factor de seguridad estático en un talud de roca. Los casos cubiertos incluyen taludes en roca cortados por uno, dos o tres series de uniones. Para lo cual se requiere hacer las siguientes hipótesis de resistencia.

- El material en los planos de contacto no resiste tensión.
- El material en los planos de contacto es puramente friccionante.
- El bloque es indeformable.
- El plano de contacto es indeformable.

Ejemplos numéricos son dados, donde varias combinaciones de análisis vectorial de Wittke y Londe son utilizados. La noción de resistencia dinámica está contenida en este capítulo,

además de ejemplos para calcular la resistencia mínima dinámica.

Los métodos dados en este capítulo para calcular la resistencia dinámica de los taludes en roca en tres dimensiones, toman en cuenta las fuerzas producidas por movimientos dinámicos (sismos).

II.2 Análisis de estabilidad por deslizamiento de una cuña sobre un plano.

II.2.1. Cálculo del factor de seguridad estático.

El caso más simple del problema de estabilidad de un talud en un macizo rocoso es cuando se puede hacer un análisis bidimensional, para ello tiene que ser sensiblemente paralelos los rumbos de las fracturas con el rumbo del talud, como es mostrado en la figura 2.1.

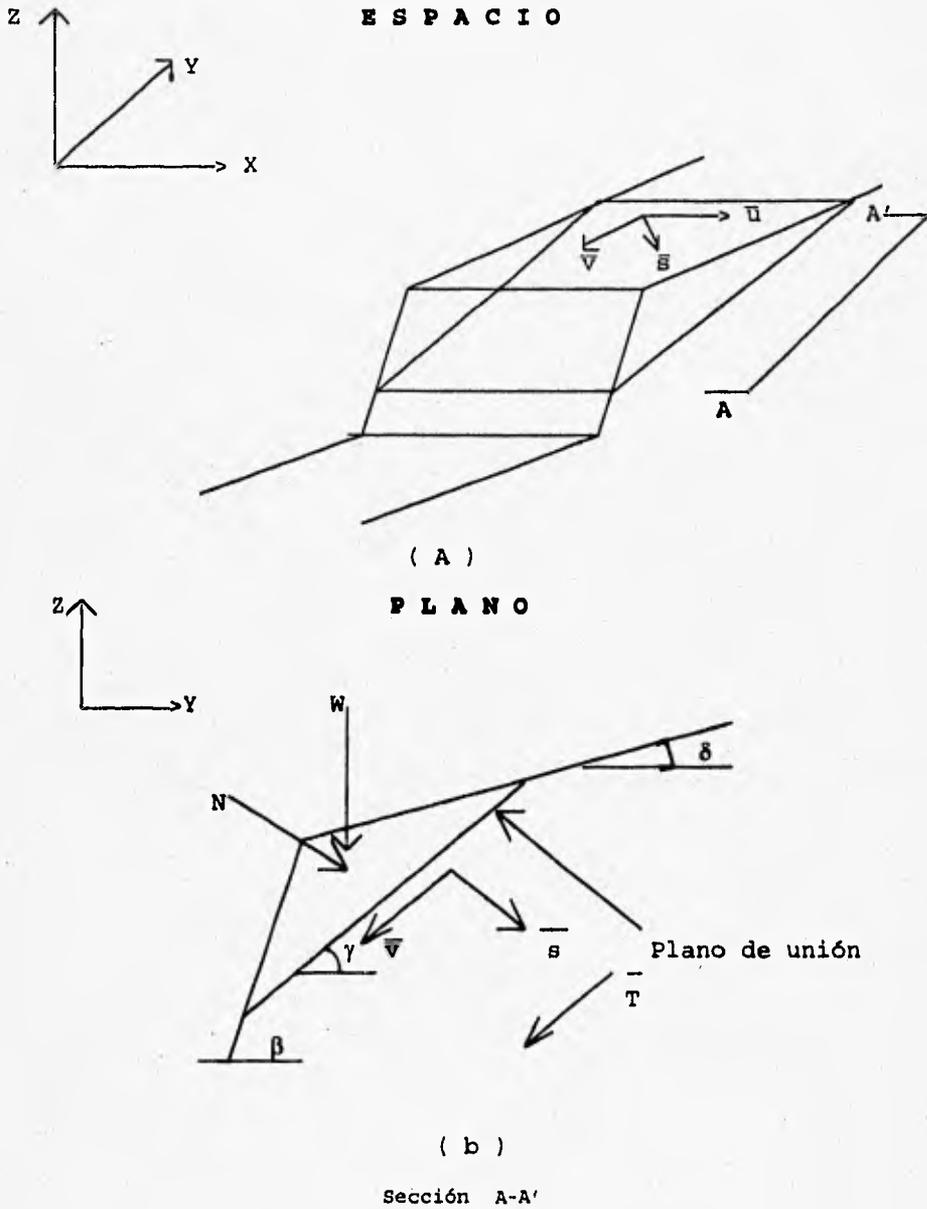


FIG. 2.1 DESLIZAMIENTO EN UN PLANO - RUMBO DE UN PLANO
PARALELO AL RUMBO DE LA CARA DE UN TALUD.

El sistema coordenado adoptado en este trabajo, es aquel donde se hace coincidir el eje x con la dirección del rumbo del talud, esta condición puede ser expresada cuando el vector unitario \bar{u} tiene componentes cero en las direcciones "y" y "z".

Ejemplo:

$$\bar{u} = u_x i + u_y j + u_z k = i + 0 j + 0 k$$

Entonces el vector unitario \bar{v} en la dirección de la inclinación tiene su componente x igual a cero.

Ejemplo:

$$\bar{v} = v_x i + v_y j + v_z k = 0 i + v_y j + v_z k$$

La inclinación de la línea de falla del plano (γ), determinará la posibilidad cinemática de deslizamiento. El ángulo de inclinación γ , está dado por la expresión:

$$\tan \gamma = \frac{v_z}{v_y} \quad (2.1)$$

Donde γ es el ángulo de inclinación del plano.

Para que el deslizamiento sea cinemáticamente posible, γ debe de ser más pequeño que β como es mostrado en la Fig. 2.1(b).

Si $\beta = 0$, entonces γ debe ser más pequeño que δ para que el deslizamiento sea posible.

Cuando un talud actúa únicamente por gravedad y el plano de falla está orientado paralelamente a la cara del talud, entonces el deslizamiento ocurrirá paralelamente al vector unitario en la dirección de la inclinación " \bar{v} ".

Si proyectamos el vector \bar{W} sobre el vector unitario \bar{v} , obtendremos la magnitud de un vector paralelo a \bar{v} , que lo denominaremos con la letra T.

Por lo que obtenemos:

$$\bar{T} = \bar{W} \cdot \bar{v} \quad (2.2)$$

Donde $\bar{W} = (0, 0, -W)$. El vector \bar{T} es dado por:

$$\bar{T} = T \bar{v} \quad (2.3)$$

La magnitud de la componente del peso, normal a la dirección del deslizamiento es N, obteniéndose de la siguiente manera:

El vector N es dado por: $\bar{N} = N \bar{s}$

donde:

$$N = \bar{W} \cdot \bar{s} \quad (2.4)$$

Donde \bar{s} es el vector unitario normal al plano de deslizamiento como es dado por $\bar{u} \times \bar{v}$. La magnitud de la fuerza de resistencia disponible es dada por $(N \tan \phi)$ donde ϕ es el ángulo de resistencia de fricción entre las superficies unidas en la dirección de deslizamiento. El factor de seguridad contra el deslizamiento es el cociente de la fuerza de resistencia y la fuerza actuante en la dirección del deslizamiento y está dada por :

$$F.S. = \frac{\text{Fuerza Resistente}}{\text{Fuerza Actuante}} = \frac{N \tan \phi}{T} = \frac{(\bar{W} \cdot \bar{s}) \tan \phi}{(\bar{W} \cdot \bar{v})} \quad (2.5)$$

Si :

F.S. < 1 *Se tiene equilibrio inestable.*

F.S. = 1 *Se tiene equilibrio crítico.*

F.S. > 1 *Se tiene equilibrio estable.*

Para el caso mostrado en la fig. 2.1 el vector unitario en la dirección de la orientación es dado por $\bar{u} = i + 0j + 0k$; $u_x = i$ y la inclinación es dada por $\bar{v} = 0i + v_y j + v_z k$. El vector unitario \bar{s} normal al plano de falla es dado por:

$$\bar{s} = \bar{u} \times \bar{v} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & v_y & v_z \end{vmatrix} = 0i - v_z j + v_y k$$

Así, la magnitud de la componente del peso en la dirección de deslizamiento es dada por:

$$\vec{W} = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} - W \vec{k}$$

$$T = \vec{W} \cdot \vec{v} = -W v_z \quad (2.6)$$

y la componente del peso, normal al plano de falla es:

$$N = \vec{W} \cdot \vec{s} ;$$

$$\vec{s} = 0 \vec{i} - v_z \vec{j} + v_y \vec{k}$$

$$N = \vec{W} \cdot \vec{s} = -W v_y \quad (2.7)$$

Así el factor de seguridad de acuerdo a la ec. (2.5) es :

$$F.S. = \frac{(\vec{W} \cdot \vec{s}) \tan \phi}{(\vec{W} \cdot \vec{v})}$$

Substituyendo obtenemos que :

$$F.S. = \frac{-W v_y \tan \phi}{-W v_z} = \frac{v_y}{v_z} \tan \phi \quad (2.8)$$

Donde en la ec. 2.1 tenemos :

$$\tan \gamma = \frac{v_z}{v_y}$$

Por lo tanto:

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \gamma} \quad (2.8')$$

la cual es una expresión conocida para el factor de seguridad de taludes libres a deslizar, en dirección de la inclinación y solo bajo el efecto de gravedad. Si un talud es cargado por su propio peso \bar{W} , y por la presión de poro del agua \bar{U} actuando en el plano de falla en la dirección del vector unitario \bar{s} , entonces el factor de seguridad es dado por :

$$F.S. = \frac{\sum FR}{\sum FA} = \frac{(N - U) \tan \phi}{T}$$

donde:

$$F.S. = \frac{[(\vec{W} \cdot \vec{s}) - U] \tan \phi}{(\vec{W} \cdot \vec{v})} \quad (2.9)$$

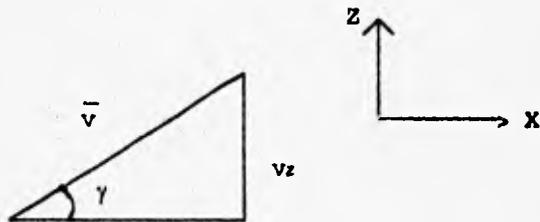
Cuando la magnitud de la presión del agua U es dada por KW , la ecuación (2.9) se reduce a :

$$F.S. = \frac{(-W v_y - KW)}{-W v_z} \tan \phi = \frac{W v_y}{-W v_z} \tan \phi + \frac{-KW}{-W v_z} \tan \phi$$

$$F.S. = \frac{v_y}{v_z} \tan \phi + K \frac{\tan \phi}{v_z}$$

Donde tenemos :

$$|\vec{v}| = 1$$



$$\text{Sen } \gamma = \frac{-v_z}{|\vec{v}|}$$

Substituyendo tenemos:

$$\text{Sen } \gamma = \frac{-v_z}{1}$$

$$v_z = - \text{Sen } \gamma$$

Por lo tanto :

$$\text{F.S.} = \frac{\tan \phi}{\tan \gamma} - K \frac{\tan \phi}{\text{sen } \gamma} \quad (2.10)$$

En donde γ es la inclinación del plano de falla.

El caso debe también ser considerado donde el deslizamiento puede ocurrir en un plano de unión como es mostrado en la figura 2.2. En el caso general de una cuña de deslizamiento puede ser dado por su peso (W), la fuerza hidráulica (U) actuando en el plano de deslizamiento y una fuerza externa (Q) la cual es aplicada por una estructura, como un dique. En este caso, se tomarán en cuenta en el análisis de deslizamiento las fuerzas W , U y Q actuando en la cuña, mismas que serán adicionadas vectorialmente a la resultante R , la cual es dada por la siguiente ecuación:

$$\vec{R} = \vec{W} + \vec{U} + \vec{Q} \quad (2.11)$$

La reacción de la resultante $\overline{R'}$ es igual y opuesta a la resultante \overline{R} , como es mostrado en la figura 2.3. Así la dirección del deslizamiento es en la dirección de la proyección \overline{R} en un plano a b c y no necesariamente en la dirección de la inclinación de la resultante. El ángulo de fricción dinámico (ϕ'), es dado por la siguiente ecuación :

$$\tan \phi' = \frac{\text{Proyección Tangencial de la Resultante}}{\text{Proyección Normal de la Resultante}} = \frac{R_T}{R_N}$$

$$\tan \phi' = \frac{[(R_y s_z - R_z s_y)^2 + (R_z s_x - R_x s_z)^2 + (R_x s_y - R_y s_x)^2]^{\frac{1}{2}}}{R_x s_x + R_y s_y + R_z s_z}$$

ec (2.12)

Así el factor de seguridad para este caso es dado por :

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \phi'} \quad (2.13)$$

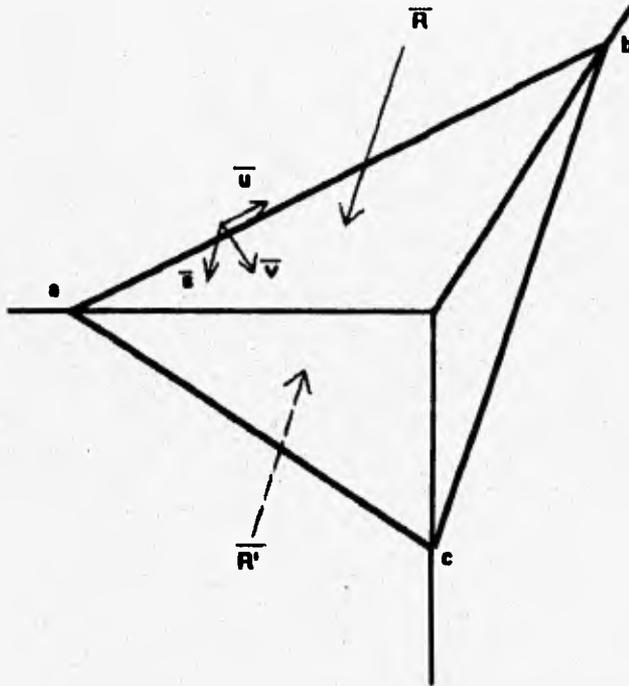


FIG. 2.3 DESLIZAMIENTO DE LA CUÑA EN UN PLANO

II.2.2 Cálculo de la resistencia dinámica.

Wittke ha tratado la carga sísmica como una carga estática equivalente, aplicada en un plano horizontal y paralelo a la proyección del vector unitario en la dirección de la inclinación \bar{v} . Así, de acuerdo con el análisis de Wittke para carga sísmica, el problema es analizado como el caso anterior, donde:

$$\bar{R} = \bar{W} + \bar{U} + \bar{Q} + \bar{H}$$

$$H = k_1 W$$

$$\bar{H} = H \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|}$$

$$\bar{v} = v_x i + v_y j + 0 k$$

Por lo tanto:

$$\bar{H} = \left(\frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} k_1 W \right) i + \left(\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} k_1 W \right) j + 0 k$$

El coeficiente sísmico k_1 es tomado entre 0 y 0.2 dependiendo de la intensidad del movimiento esperado, y la fuerza H está en un plano horizontal y paralelo a la proyección del vector unitario en una dirección de la inclinación \bar{v} . El factor de

seguridad es dado por la ecuación 2.13. Esta aproximación es considerada conservadora cuando se estudia el problema de forma dinámica. La aproximación propuesta en este trabajo para la estabilidad dinámica de los taludes en roca según los conceptos de Newmark. De manera que, para usar el método de análisis de Newmark, es necesario establecer la resistencia para soportar las cargas dinámicas. Esta resistencia dinámica, cuenta también con la fuerza necesaria para conservar la estabilidad estática.

La resistencia dinámica se denota por \overline{NW} donde \overline{W} es el peso que ocasiona deslizamiento del bloque y N es el coeficiente a ser determinado de la siguiente manera. La fuerza \overline{NW} es aquella fuerza necesaria para hacer posible el deslizamiento del bloque (Ejemplo F.S.=1).

Dependiendo de la dirección en la cual \overline{NW} es aplicada, su magnitud variará.

Cuando el bloque se desliza sobre el plano de falla, como es mostrado en la figura 2.4(a), \overline{NW} deberá ser aplicada en una dirección θ respecto a la horizontal, la cual dará el valor mínimo de \overline{NW} para provocar que el bloque se deslice. La dirección y magnitud del valor mínimo de \overline{NW} puede ser determinado como se muestra en la fig. 2.4(b). La dirección y magnitud del peso \overline{W} es conocida, y la dirección de la resultante \overline{R} también es conocida y forma un ángulo con

respecto al plano normal de deslizamiento, cuando el deslizamiento empieza a tener lugar.

Al variar la dirección del vector \overline{NW} , teniendo este su origen en el extremo del vector peso (W), se obtiene el valor mínimo; quedando \overline{NW} ortogonal a la resultante \overline{R} . De esta manera, desde el punto de vista geométrico, como se muestra en la figura 2.4(b) la magnitud mínima de \overline{NW} es dada por :

$$\text{Sen } (\varphi - \gamma) = \frac{\overline{NW}}{W} ;$$

Despejando tenemos:

$$\overline{NW} = W \text{ sen } (\varphi - \gamma) \quad (2.13')$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$N = \text{sen } (\varphi - \gamma)$$

Donde φ es el ángulo de resistencia a la fricción y γ es la inclinación. El valor mínimo de \overline{NW} da un resultado conservador de la resistencia dinámica ya que asume los movimientos sísmicos en la dirección más desfavorable para el talud estudiado.

respecto al plano normal de deslizamiento, cuando el deslizamiento empieza a tener lugar.

Al variar la dirección del vector \overline{NW} , teniendo este su origen en el extremo del vector peso (W), se obtiene el valor mínimo; quedando \overline{NW} ortogonal a la resultante \overline{R} . De esta manera, desde el punto de vista geométrico, como se muestra en la figura 2.4(b) la magnitud mínima de NW es dada por :

$$\text{Sen } (\varphi - \gamma) = \frac{NW}{W};$$

Despejando tenemos:

$$NW = W \text{ sen } (\varphi - \gamma) \quad (2.13')$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$N = \text{sen } (\varphi - \gamma)$$

Donde φ es el ángulo de resistencia a la fricción y γ es la inclinación. El valor mínimo de NW da un resultado conservador de la resistencia dinámica ya que asume los movimientos sísmicos en la dirección más desfavorable para el talud estudiado.

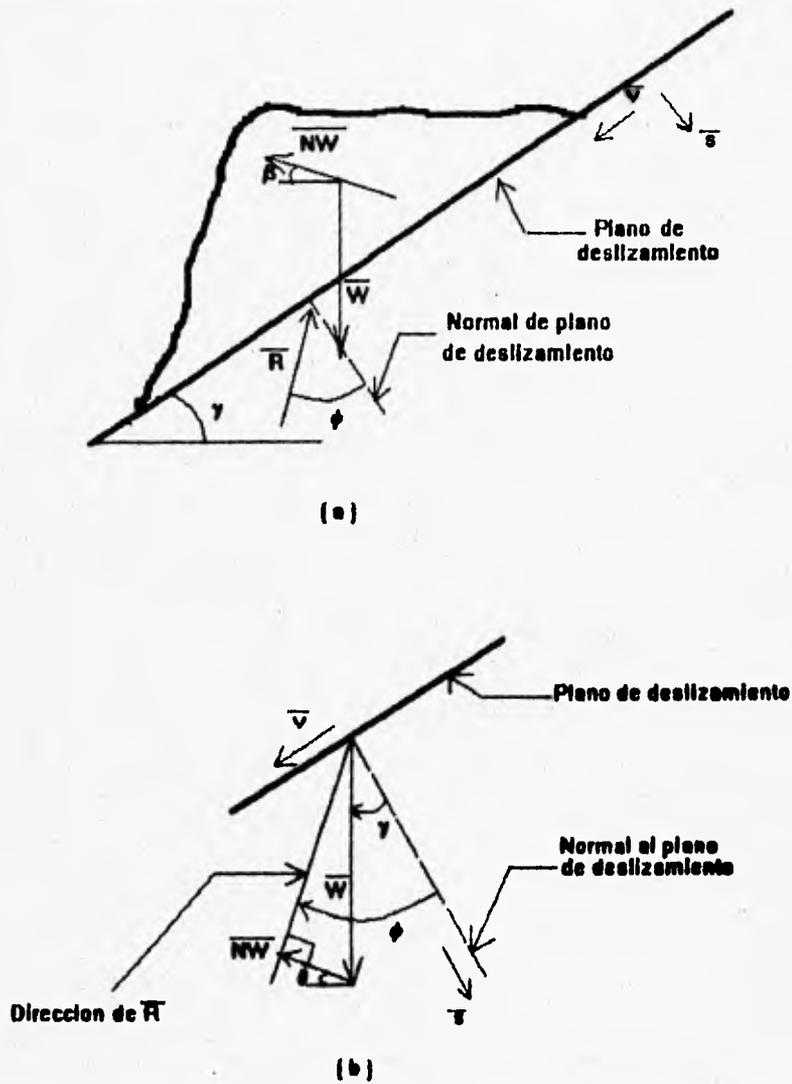


FIG. 2.4 DESLIZAMIENTO DEL BLOQUE SOBRE LA SUPERFICIE DE FALLA

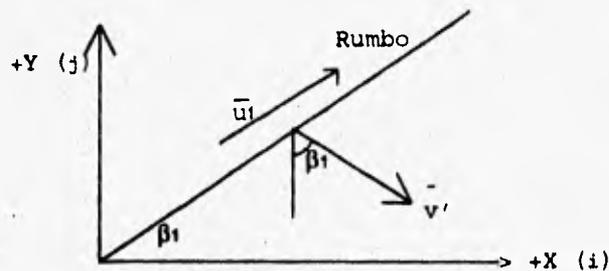
II.3. Cálculo de estabilidad de taludes que contienen dos planos de falla por el análisis vectorial.

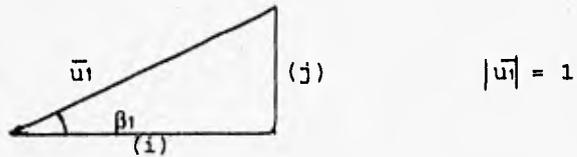
II.3.1. Cálculo del factor de seguridad para cargas estáticas.

II.3.1.1. Descripción geométrica y cargas.

El caso general de 2 planos de unión como es mostrado en la fig. 2.5 donde los planos 1 y 2 denotan las superficies de falla, los planos 3 y 4 denotan los planos que definen las caras del talud, γ_1 y γ_2 denotan los ángulos de inclinación de los planos 1 y 2, β_1 y β_2 denotan los ángulos de orientación de planos 1 y 2 medidos en sentido contrario a las manecillas del reloj, desde la dirección positiva "x" y " α " y " δ " denotan la inclinación de los planos 3 y 4 con la horizontal. El vector rumbo, es un vector paralelo y unitario a la línea de rumbo y tiene sentido positivo hacia el eje "y", (u), y está dado por la ecuación:

$$u_1 = \cos \beta_1 i + \sin \beta_1 j + 0 k \quad \text{ec. (A)}$$





$$\cos \beta_1 = \frac{\text{C.A.}}{1} \rightarrow \text{C.A.} = \cos \beta_1$$

$$\text{Sen } \beta_1 = \frac{\text{C.O.}}{1} \rightarrow \text{C.O.} = \text{Sen } \beta_1$$

$$\bar{u}_1 = \cos \beta_1 i + \text{Sen } \beta_1 j + 0 k$$

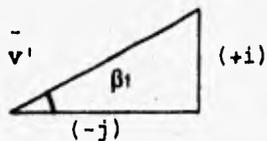
Análogamente

$$\bar{u}_2 = \cos \beta_2 i + \text{Sen } \beta_2 j + 0 k$$

El vector echado (\bar{v}) es ortogonal al vector rumbo, esta contenido en el plano de falla y tiene sentido hacia abajo y está dado por la ecuación:

$$\bar{v}_1 = \cos \gamma_1 \text{ Sen } \beta_1 i - \cos \gamma_1 \cos \beta_1 j - \text{Sen } \gamma_1 k \quad \text{ec. (B)}$$

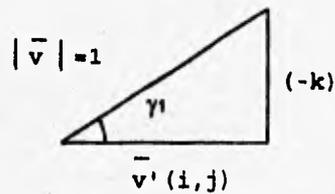
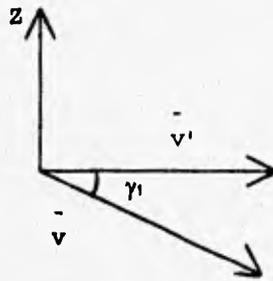
Donde:



$$\cos \beta_1 = \frac{\text{C.A.}}{|\bar{v}'|} \rightarrow \text{C.A.} = |\bar{v}'| \cos \beta_1$$

$$\text{Sen } \beta_1 = \frac{\text{C.O.}}{|\bar{v}'|} \rightarrow \text{C.O.} = |\bar{v}'| \text{ Sen } \beta_1$$

$$\bar{v}' = |\bar{v}'| (\text{Sen } \beta_1) i - |\bar{v}'| (\text{Cos } \beta_1) j$$



$$\text{Sen } \gamma_1 = \frac{\text{C.O.}}{1} \rightarrow \text{C.O.} = \text{Sen } \gamma_1$$

$$\text{Cos } \gamma_1 = \frac{\text{C.A.}}{1} \rightarrow \text{C.A.} = \text{Cos } \gamma_1$$

$$\bar{v} = \text{Cos } \gamma_1 (i, j) - \text{Sen } \gamma_1 k$$

$$\vec{v}_1 = \cos \gamma_1 \operatorname{Sen} \beta_1 \vec{i} - \cos \gamma_1 \cos \beta_1 \vec{j} - \operatorname{Sen} \gamma_1 \vec{k}$$

Análogamente:

$$\vec{v}_2 = \cos \gamma_2 \operatorname{Sen} \beta_2 \vec{i} - \cos \gamma_2 \cos \beta_2 \vec{j} - \operatorname{Sen} \gamma_2 \vec{k}$$

Los vectores unitarios normales a cada plano son dados por:

$$\vec{n}_1 = \vec{u}_1 \times \vec{v}_1$$

y

$$\vec{n}_2 = \vec{u}_2 \times \vec{v}_2$$

ec. (C)

Nota: En la Fig. 2.5(b) vemos que \vec{n}_1 está dirigido hacia dentro del plano 1 y \vec{n}_2 está dirigido hacia afuera del plano 2, cuando las normales son definidas de esta manera. Como se observa en la figura 2.5(a); el plano 1 es aquel que tiene el valor más bajo de β . En el caso donde las orientaciones de los planos coinciden; el plano 1 es aquel con el valor menor de γ . Esta convención es necesaria para mantener el signo apropiado de las operaciones vectoriales.

La carga del talud consiste de: 1.- carga muerta (\vec{W}) actuando en el centro de gravedad de la masa considerada, 2.- carga viva (Q), aplicada en cualquier punto, 3.- fuerzas hidráulicas (presión de poro) (\vec{U}_1) y (\vec{U}_2) actuando en planos 1 y 2 respectivamente y 4.- cargas dinámicas inducidas por movimientos telúricos (sismos). La resultante \vec{R} de las cargas puede ser determinado para cualquier caso.

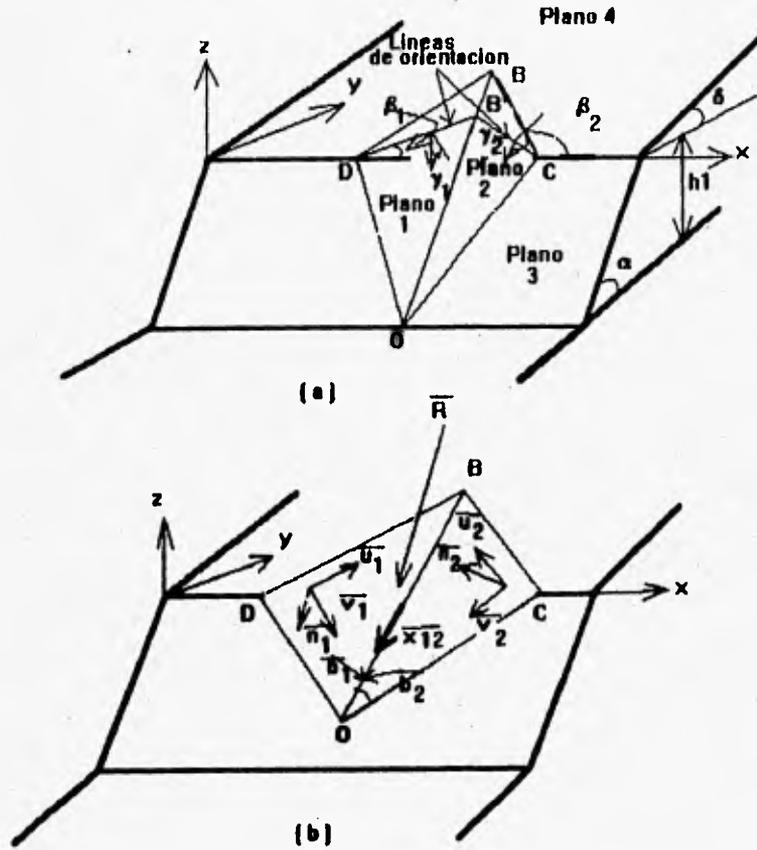


FIG. 2.5 ESTABILIDAD DE UNA CUÑA LIMITADA POR DOS PLANOS.

II.3.1.2. Determinación del modo de deslizamiento para la falla.

Para el caso de un tetraedro limitado por 2 planos, el deslizamiento puede ocurrir a lo largo de la línea de intersección de los 2 planos, o por el deslizamiento en cualquiera de los 2 planos.

El primer paso para determinar la falla, es revisar la distribución de fuerzas tendientes a ascender el tetraedro desde cualquiera de los 2 planos de soporte. Así, considerando la cuña de roca OBCD (Fig. 2.5b), la fuerza resultante \bar{R} tiende a romper el contacto entre el tetraedro y los planos 1 y 2 respectivamente si:

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_1 < 0$$

y

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_2 > 0 \quad (2.14)$$

Si la ec. 2.14 se cumple entonces la fuerza resultante \bar{R} tiende a empujar en forma vertical, ambos soportes del tetraedro. De esta manera el equilibrio no es posible a menos que las uniones puedan tomar tensión, o se calcule algún tipo de anclaje en la roca. Normalmente esto no ocurre en taludes grandes, cuando las fuerzas que actúan son peso propio y presión de poro, pero si puede ocurrir en pequeños tetraedros donde la falla se encuentra cerca de la superficie más alta

del talud. Cuando la Ec. 2.14 se satisface, el tetraedro se mueve en forma vertical en uno de los planos de soporte, por lo tanto no puede deslizar en ese plano.

Si la Ec. 2.14 no se cumple, quiere decir que el movimiento vertical de la cuña no se da.

Ejemplo:

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_1 > 0$$

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_2 < 0 \quad (2.15)$$

Entonces debemos hacer más pruebas cinemáticas para ver si el deslizamiento tiene lugar únicamente en un plano, o a lo largo de la línea de intersección de los planos.

De manera de evaluar el modo de deslizamiento es necesario definir 2 nuevos vectores, \bar{b}_1 y \bar{b}_2 , los cuales son dados por:

$$\bar{b}_1 = \bar{x}_{12} \times \bar{n}_1 \quad \Rightarrow \quad (2.16)$$

$$\bar{b}_2 = \bar{x}_{12} \times \bar{n}_2$$

Donde $\bar{x}_{12} = \bar{n}_2 \times \bar{n}_1$

que se muestran en la Fig. 2.5(b). El vector $\overline{b_1}$ está en el plano 1 perpendicular a la línea de intersección $\overline{x_{12}}$ y el vector $\overline{b_2}$ está en el plano 2 perpendicular a la línea de intersección $\overline{x_{12}}$.

Si el deslizamiento ocurre a lo largo de la línea de intersección $\overline{x_{12}}$, entonces las ecuaciones 2.17 y 2.18, deben ser satisfechas simultáneamente.

$$\overline{R} \cdot \overline{b_1} > 0 \quad (2.17)$$

$$\overline{R} \cdot \overline{b_2} > 0 \quad (2.18)$$

Entonces:

$$E_x = \tan^{-1} \left(\frac{x_{12z}}{x_{12y}} \right) \quad (2.19)$$

y x_{12y} , x_{12z} son componentes del vector $\overline{x_{12}}$ en la dirección "y" y "z".

Si el deslizamiento ocurre en el plano 1 solamente, entonces las siguientes 2 condiciones deben ser satisfechas:

$$\overline{R} \cdot \overline{n_1} > 0 \quad (2.20)$$

y

$$\overline{R} \cdot \overline{b_1} < 0 \quad (2.21)$$

De manera similar si el deslizamiento ocurre en el plano 2 únicamente, entonces las siguientes 2 condiciones deben ser satisfechas.

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_2 < 0 \quad (2.22)$$

$$\bar{R} \cdot \bar{b}_2 < 0 \quad (2.23)$$

La interpretación física de las ecuaciones 2.17-2.23 es la siguiente. Se satisface la ec. 2.17 cuando la fuerza resultante \bar{R} tiene una componente que actúa sobre la cuña en el plano 1, empujando hacia la línea de intersección \bar{x}_{12} .

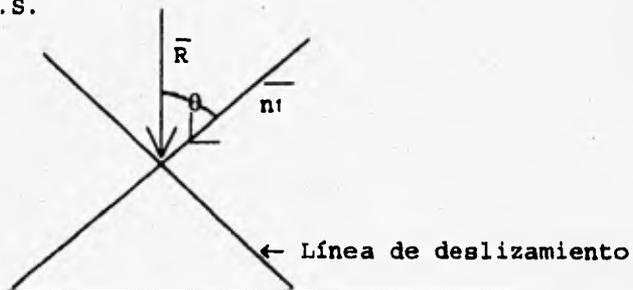
De manera similar la ec. 2.18 se satisface cuando la fuerza resultante \bar{R} tiene una componente que actúa sobre la cuña en el plano 2, empujándola hacia la línea de intersección \bar{x}_{12} . Así, las ecuaciones 2.17 y 2.18 aseguran que la fuerza resultante \bar{R} "acuña" al tetraedro entre los 2 planos, de manera que el deslizamiento solo pueda ocurrir en ambos planos, sobre la línea de intersección. Así cuando las ecuaciones 2.17 y 2.18 son satisfechas simultáneamente, entonces el deslizamiento ocurre a lo largo de la línea de intersección. La tendencia a deslizar será hacia abajo si $\bar{R} \cdot \bar{x}_{12} > 0$ y hacia arriba si $\bar{R} \cdot \bar{x}_{12} < 0$ (Fig. 2.5b).

La ec. 2.21 indica que la componente de \vec{R} en la dirección de \vec{b}_1 tiende a mover el bloque fuera del plano 2, deslizando en el plano 1 y la ec. 2.20 establece la condición que garantiza el contacto de la cuña con el plano 1. Así las ec. 2.20 y 2.21 son condiciones suficientes y necesarias para que el deslizamiento ocurra en el plano 1. De manera similar las ecuaciones 2.22 y 2.23 especifican las condiciones de deslizamiento en el plano 2.

II.3.1.3. Cálculo del factor de seguridad por deslizamiento.

Si las condiciones anteriores muestran que el deslizamiento ocurre solo en un plano, entonces el factor de seguridad es calculado con la ec. 2.5. Así, cuando el deslizamiento ocurre en el plano 1, el factor de seguridad se obtiene de la siguiente forma:

- Supongamos que se conoce la línea de deslizamiento.
- Trazamos un plano que contenga a la resultante R y a la línea de deslizamiento.
- Definimos el F.S.



$$F.S. = \frac{\sum F.R.}{\sum F.A.}$$

$$\sum F.R. = |\bar{R}| \cos \theta \tan \varphi = |\bar{R}| |\bar{n}_1| \cos \theta \tan \varphi = \bar{R} \cdot \bar{n}_1 \tan \varphi \quad \text{ec. (2.24)}$$

$$\sum F.A. = |\bar{R}| \sin \theta = |\bar{R}| |\bar{n}_1| \sin \theta = |\bar{R} \times \bar{n}_1| \quad \text{ec. (2.25)}$$

$$F.S. = \frac{\sum F.R.}{\sum F.A.} = \frac{(\bar{R} \cdot \bar{n}_1) \tan \varphi}{|\bar{R} \times \bar{n}_1|} \quad (2.26)$$

De manera análoga el F.S. para deslizamiento en el plano 2 esta dado por:

$$F.S. = \frac{\sum F.R.}{\sum F.A.} = \frac{-(\bar{R} \cdot \bar{n}_2) \tan \varphi}{|\bar{R} \times \bar{n}_2|} \quad (2.27)$$

El signo negativo que aparece en la ecuación 2.27 es debido a la dirección del vector normal \bar{n}_2 como es mostrado en la fig. (2.5b).

Si las ecuaciones 2.17 y 2.18 son satisfechas, entonces el deslizamiento ocurre a lo largo de la línea de intersección \bar{x}_{12} . Así, el factor de seguridad es calculado de la siguiente manera.

El primer paso es calcular la magnitud de la fuerza actuante $|\overline{T_{12}}|$, mostrado en la Fig. 2.6. Está dado por :

$$|\overline{T_{12}}| = \frac{\overline{R} \cdot \overline{x_{12}}}{|\overline{x_{12}}|} \quad (2.28)$$

Donde $|\overline{x_{12}}|$ representa la magnitud del vector $\overline{x_{12}}$. El vector $\overline{T_{12}}$ esta en la misma dirección que $\overline{x_{12}}$ y está dado por:

$$\overline{T_{12}} = |\overline{T_{12}}| \frac{\overline{x_{12}}}{|\overline{x_{12}}|} \quad (2.29)$$

Es conveniente definir el vector $\overline{N_{12}}$, normal a la línea de intersección, el cual está dado por:

$$\overline{N_{12}} = \overline{R} - \overline{T_{12}} \quad (2.30)$$

De manera de evaluar la fuerza de fricción en los planos, es necesario determinar las componentes $\overline{N_1}$ y $\overline{N_2}$ de $\overline{N_{12}}$ actuando normal a los planos 1 y 2 respectivamente. La relación de los vectores \overline{R} , $\overline{T_{12}}$, $\overline{N_{12}}$, $\overline{N_1}$ y $\overline{N_2}$ son mostrados en los cortes AA' y BB' de la fig. 2.6. En donde se observa que:

$$\overline{N_{12}} = \overline{N_1} + \overline{N_2} = |\overline{N_1}| \overline{n_1} + |\overline{N_2}| \overline{(-n_2)} \quad (2.31)$$

Donde $|\overline{N_1}|$ y $|\overline{N_2}|$ representan las magnitudes de las componentes de los vectores $\overline{N_1}$ y $\overline{N_2}$ respectivamente.

Así:

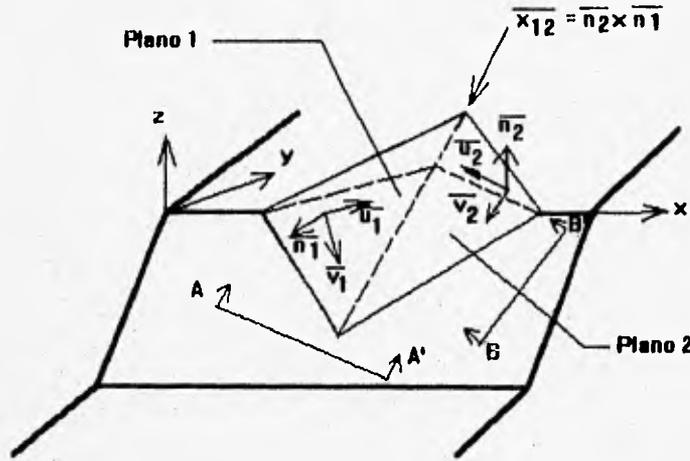
$$N_{12x} = N_1 n_{1x} - N_2 n_{2x} \quad (2.32)$$

$$N_{12y} = N_1 n_{1y} - N_2 n_{2y} \quad (2.33)$$

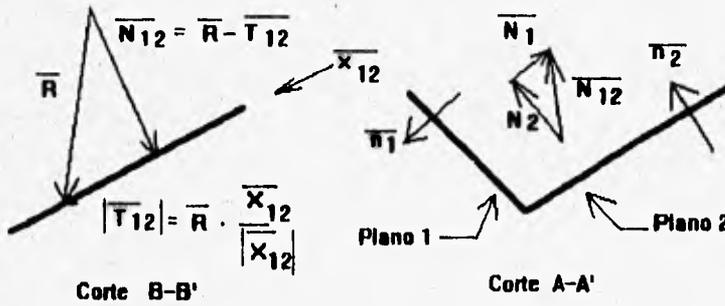
$$N_{12z} = N_1 n_{1z} - N_2 n_{2z} \quad (2.34)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos los valores de N_1 y N_2 . Después de haber obtenido los valores de N_1 y N_2 , el factor de seguridad de deslizamiento en ambos planos es determinado a través de la ecuación :

$$F.S. = \frac{|\overline{N_1}| \tan \varphi_1 + |\overline{N_2}| \tan \varphi_2}{|\overline{T_{12}}|} \quad (2.35)$$



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



2.6 DESLIZAMIENTO EN DOS PLANOS

II.3.2. Cálculo de la resistencia dinámica en contra del deslizamiento en dos planos.

La dirección y magnitud de la resistencia dinámica mínima \overline{NW} que es necesaria para hacer que el bloque deslice sobre los planos es encontrado con el siguiente procedimiento.

Primero se define un vector unitario $\overline{r_1}$ en dirección de la resultante $\overline{R_1}$ en el plano 1 (Fig 2.7). En el estado de equilibrio límite $\overline{R_1}$ está inclinado un ángulo ϕ_1 , con respecto a la normal $\overline{s_1}$ en el plano 1 y tiende a oponerse al movimiento descendente de la cuña a lo largo de la línea de intersección $\overline{x_{12}}$.

De esta manera,

$$\overline{r_1} = -\overline{s_1} \cos \phi_1 - \frac{\overline{x_{12}}}{|\overline{x_{12}}|} \sin \phi_1 \quad (2.36)$$

De manera similar un vector unitario $\overline{r_2}$ es definido en la dirección de la resultante $\overline{R_2}$ en el plano 2. En la Fig. 2.7 puede observarse que:

$$\overline{r_2} = \overline{s_2} \cos \phi_2 - \frac{\overline{x_{12}}}{|\overline{x_{12}}|} \sin \phi_2 \quad (2.37)$$

Donde ϕ_2 es el ángulo de fricción en el plano 2.

La magnitud de la resistencia dinámica del vector \overline{NW} es mínima cuando el vector \overline{NW} es normal a los planos $\overline{R_1}$ y $\overline{R_2}$. De esta manera puede obtenerse un vector unitario $\overline{(n)}$ en la dirección de \overline{NW} con la siguiente ecuación:

$$\overline{n} = \frac{(\overline{r_1} \times \overline{r_2})}{|\overline{r_1} \times \overline{r_2}|} \quad (2.38)$$

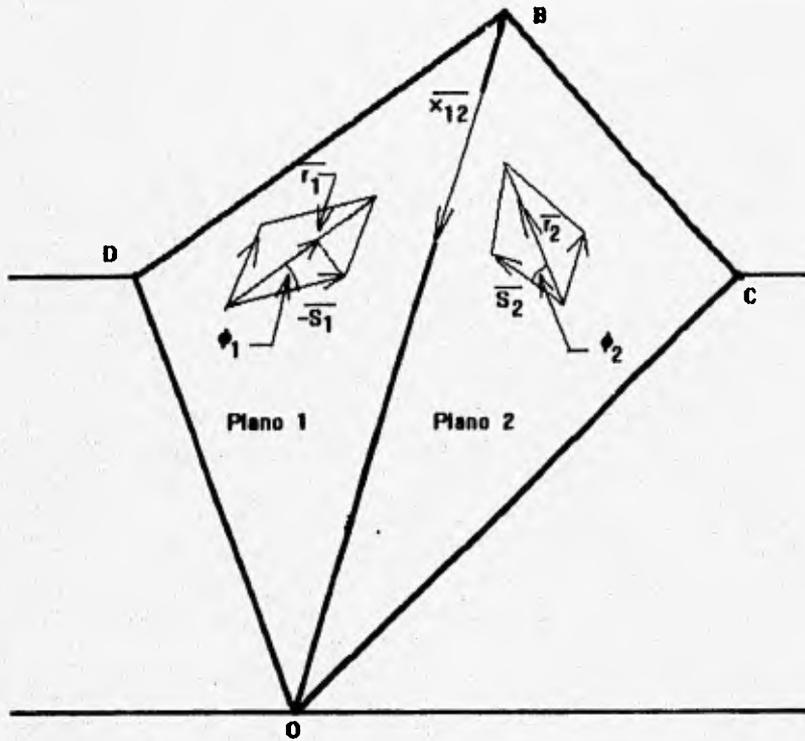
Donde $|\overline{r_1} \times \overline{r_2}|$ representa la magnitud del vector $\overline{r_1} \times \overline{r_2}$.

La magnitud de la resistencia mínima dinámica (NW), puede ser determinada por la ecuación :

$$NW = \overline{R} \cdot \overline{n} \quad (2.39)$$

Donde \overline{R} es la resultante de todas las fuerzas estáticas que actúan en la cuña de roca. De la ec. 2.39 se obtiene:

$$N = \frac{\overline{R} \cdot \overline{n}}{W} \quad (2.40)$$



$$|\bar{r}_1| = 1 \qquad |\bar{r}_2| = 1$$

$$\bar{r}_1 = -\bar{s}_1 \cdot \cos \phi_1 - \frac{\bar{x}_{12}}{|\bar{x}_{12}|} \operatorname{sen} \phi_1 \qquad \bar{r}_2 = \bar{s}_2 \cdot \cos \phi_2 - \frac{\bar{x}_{12}}{|\bar{x}_{12}|} \operatorname{sen} \phi_2$$

FIG. 2.7 ESTABILIDAD DE UNA CUÑA LIMITADA POR DOS PLANOS DE UNION

CAPÍTULO III

EJEMPLOS NUMÉRICOS

III.1. Ejemplos de problemas de deslizamiento en un plano por análisis vectorial.

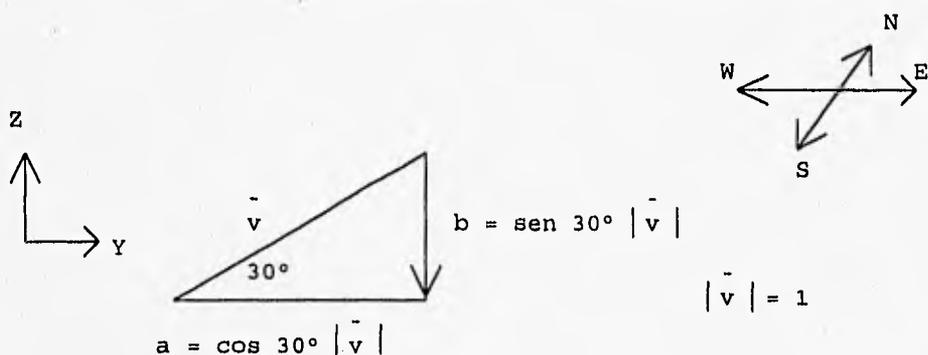
En este capítulo se muestran varios ejemplos del cálculo de estabilidad de los macizos rocosos por análisis vectorial.

Considérese una cuña de roca deslizando en un plano con orientación Este-Oeste e inclinada 30° Sur y la cual tiene un ángulo de fricción de 40°; considérese que la dirección positiva "x" sea Este, la dirección positiva "y" sea Norte y la dirección positiva "z" sea hacia arriba.

El vector unitario en la dirección de la orientación está dado por:

$$\bar{u} = i + 0j + 0k$$

El vector unitario en la dirección de inclinación, es dado por:



Entonces :

$$\vec{v} = 0 \mathbf{i} - \cos 30^\circ \mathbf{j} - \text{Sen } 30^\circ \mathbf{k}$$

y el vector unitario normal al plano es:

$$\vec{s} = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos 30^\circ & -\text{Sen } 30^\circ \end{vmatrix} = 0\mathbf{i} + 0.500\mathbf{j} - 0.866\mathbf{k}$$

y \vec{s} es dirigido hacia abajo de forma normal al plano.

Caso I

Primero considérese el factor de seguridad del bloque tomando en cuenta su peso. En este caso la fuerza resultante \vec{R} que actúa en el bloque es igual al peso \vec{W} dado por:

$$\vec{R} = \vec{W} = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} - W \vec{k}$$

La magnitud de la componente de \vec{R} normal al plano es dada por:

$$N = \vec{W} \cdot \vec{s} \quad \text{ec. (2.4)}$$

$$N = \vec{R} \cdot \vec{s} \quad \Rightarrow$$

$$\vec{R} = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} - W \vec{k};$$

$$\vec{s} = 0 \vec{i} + \text{Sen } 30^\circ \vec{j} - \text{Cos } 30^\circ \vec{k};$$

$$N = \vec{R} \cdot \vec{s} = \text{Cos } 30^\circ W$$

$$\text{entonces:} \quad \vec{N} = N \vec{s} \quad \Rightarrow$$

$$N = \text{Cos } 30^\circ W$$

$$\vec{s} = 0 \vec{i} + \text{Sen } 30^\circ \vec{j} - \text{Cos } 30^\circ \vec{k}$$

$$\vec{N} = \text{Cos } 30^\circ W (0 \vec{i} + \text{Sen } 30^\circ \vec{j} - \text{Cos } 30^\circ \vec{k})$$

$$\vec{N} = 0 \vec{i} + (\text{Cos } 30^\circ \text{ Sen } 30^\circ) W \vec{j} - (\text{Cos } 30^\circ)^2 W \vec{k}$$

$$\vec{N} = 0.866 W \vec{s} = 0 \vec{i} + 0.433 W \vec{j} - 0.750 W \vec{k}$$

la componente tangencial de \bar{R} dada en el plano de deslizamiento es:

$$\bar{R} = \bar{N} + \bar{T}$$

$$\bar{R} = 0 \text{ i} + 0 \text{ j} - W \text{ k}$$

$$\bar{N} = 0 \text{ i} + 0.433W \text{ j} - 0.75 W \text{ k}$$

donde:
$$\bar{T} = \bar{R} - \bar{N} = 0 \text{ i} - 0.433W \text{ j} - 0.25W \text{ k}$$

La magnitud de T es dada por:

$$|\bar{T}| = W [0^2 + (-0.433)^2 + (-0.25)^2]^{1/2} = 0.50 W$$

entonces:

$$F.S. = \frac{N \tan \phi}{T} \quad \text{ec. (2.5)}$$

$$F.S. = \frac{N \tan \phi}{T} = \frac{\cos 30^\circ W \tan 40^\circ}{0.50 W} = 1.453$$

Revisando por ec. 2.8' tenemos:

$$F.S. = \frac{\tan 40^\circ}{\tan 30^\circ} = 1.453$$

∴ Como F.S. > 1 se tiene que la cuña de roca es estable.

Caso II

Considérese ahora que una fuerza \vec{A} actúa en la cuña además del peso de la cuña \vec{W} . La fuerza \vec{A} actúa paralela a la orientación (Este) y tiene una magnitud de $0.20 W$.

$$\vec{A} = 0.2W i + 0 j + 0 k$$

$$\vec{W} = 0 i + 0 j - W k$$

Entonces: $\vec{R} = \vec{A} + \vec{W} = 0.2W i + 0 j - W k$

$$\vec{s} = 0 i + \text{Sen } 30^\circ j - \text{Cos } 30^\circ k$$

y $\vec{N} = \vec{R} \cdot \vec{s} = \text{Cos } 30^\circ W$

y $\vec{N} = N\vec{s} = \text{Cos } 30^\circ W (0 i + \text{Sen } 30^\circ j - \text{Cos } 30^\circ k)$

$$\vec{N} = 0 i + 0.433W j - 0.75 W k$$

La componente de \vec{R} tangencial al plano es:

$$\vec{R} = \vec{T} + \vec{N}$$

$$\vec{R} = 0.2W i + 0 j - W k$$

$$\bar{N} = 0 \text{ i} + 0.433W \text{ j} - 0.75W \text{ k}$$

$$\bar{T} = \bar{R} - \bar{N} = 0.2W \text{ i} - 0.433W \text{ j} - 0.25W \text{ k};$$

$$|\bar{T}| = W [(0.2)^2 + (-0.433)^2 + (-0.25)^2]^{1/2} = 0.54W$$

Por lo tanto de la ec. (2.5) tenemos:

$$F.S. = \frac{N \tan \phi}{T} = \frac{\cos 30^\circ W \tan 40^\circ}{0.54 W} = 1.35$$

∴ En este caso el deslizamiento no ocurre en la dirección del vector \bar{T} .

Caso III

Considérese ahora que la cuña está sujeta a peso propio y a una fuerza \bar{A} con una magnitud de $0.20W$ actuando en una dirección paralela al vector unitario, en dirección de la inclinación. En este caso la componente normal es todavía dada por $N = \bar{W} \cdot \bar{s} = \cos 30^\circ W$ como es dado en el **caso I**. La magnitud de la fuerza tangencial \bar{T} , es la suma de las magnitudes de \bar{A} y la componente tangencial del peso en el plano. El factor de seguridad es consecuentemente dado por:

$$F.S. = \frac{\cos 30^\circ W \tan 40^\circ}{0.5W + 0.20W} = 1.038$$

Nota: En este caso el factor de seguridad es ligeramente superior a la unidad, de acuerdo a la teoría el talud es estable, pero siguiendo un criterio conservador podría considerarse como un caso de equilibrio crítico y tomar medidas de estabilización a través de un anclaje.

Caso IV

Ahora considere que el plano de falla del macizo rocoso se ve afectado además del peso de la roca, como en el caso I, por una fuerza producida por el agua que penetra en la junta \bar{U} , que actúa hacia arriba y que hace que el factor de seguridad disminuya de 1.453 a 1.00. La fuerza hidráulica \bar{U} , no afecta a la proyección tangencial del peso (\bar{T}), quedando:

$$|\bar{T}| = 0.50 W$$

La magnitud de la fuerza normal $|\bar{N}|$ es igual a la que resultó en el caso I, menos la magnitud de la fuerza hidráulica $|\bar{U}|$ y está dada por:

$$|\bar{N}| = \cos 30^\circ W - |\bar{U}|$$

Por lo que:

$$F.S. = 1 = \frac{(\cos 30^\circ W - |\bar{U}|) \tan 40^\circ}{0.50 W}$$

Despejando $|\bar{U}|$ obtenemos:

$$|\bar{U}| = 0.2701 W$$

Revisando la ecuación (2.10) observamos:

$$F.S. = 1.0 = \frac{\tan \phi}{\tan \gamma} - K \frac{\tan \phi}{\sin \gamma} = \frac{\tan 40^\circ}{\tan 30^\circ} - K \frac{\tan 40^\circ}{\sin 30^\circ}$$

Despejando:

$$K = 0.2701$$

Por lo tanto: $|\bar{U}| = 0.2701 W$

Caso V

Considerando la misma cuña, con su peso \overline{W} , que tiene ahora una fuerza \overline{U} con una magnitud de $0.44W$, que actúa normal al plano de deslizamiento, y por último una fuerza \overline{A} con una magnitud de $0.60W$, la dirección de ésta es de S 45° W, con una inclinación de 10° . Entonces:

$$\overline{W} = 0 \text{ i} + 0 \text{ j} - W \text{ k}$$

$$\overline{U} = |\overline{U}| (-\overline{s})$$

Nota: El signo negativo de \overline{s} se debe ya que \overline{U} es ascendente y \overline{s} es descendente.

$$\overline{s} = 0 \text{ i} + \text{Sen } 30^\circ \text{ j} - \text{Cos } 30^\circ \text{ k}$$

$$|\overline{U}| = 0.44W$$

$$\overline{U} = 0.44W (0 \text{ i} - \text{Sen } 30^\circ \text{ j} + \text{Cos } 30^\circ \text{ k})$$

$$\overline{U} = 0 \text{ i} - 0.22W \text{ j} + 0.381W \text{ k}$$

El vector unitario, \overline{a} , en dirección de la fuerza \overline{A} está dado por la ecuación $\overline{a} = \text{Cos } \gamma \text{ Sen } \beta \text{ i} - \text{Cos } \gamma \text{ Cos } \beta \text{ j} - \text{Sen } \gamma \text{ k}$ con $\gamma = 170^\circ$ y $\beta = 135^\circ$, entonces:

$$\bar{a} = [(-\cos 170^\circ \operatorname{sen} 135^\circ)i - (\cos 170^\circ \cos 135^\circ)j - \operatorname{sen} 170^\circ k]$$

$$\bar{a} = -0.696 i - 0.696 j - 0.173 k$$

Entonces:

$$\bar{A} = A\bar{a} = -0.4178 W i - 0.4178 W j - 0.1041 W k$$

$$y \quad \bar{R} = \bar{W} + \bar{U} + \bar{A} = -0.4178 W i - 0.6378 W j - 0.7231 W k$$

La magnitud de la componente R normal al plano de deslizamiento es dada por:

$$N = R \cdot s = 0.3073 W$$

$$\text{Por lo tanto} \quad \bar{N} = Ns = 0 i + 0.1537 W j - 0.2662 W k$$

La componente \bar{R} tangencial al plano de deslizamiento es:

$$\bar{T} = \bar{R} - \bar{N} = -0.4178 W i - 0.7915 W j - 0.457 W k$$

$$|\bar{T}| = 1.005 W$$

$$F.S. = \frac{N \tan 40^\circ}{T} = \frac{0.3073 W \tan 40^\circ}{1.005 W} = 0.2566$$

∴ Como $F.S. < 1$ se tiene equilibrio inestable.

Nota: En este caso se recomienda tomar medidas de drenaje para disminuir la presión hidráulica y con esto lograr la estabilidad del macizo rocoso; en el capítulo IV se presentan ejemplos de estos sistemas.

Caso VI

Considérese el talud sometido sólo a peso propio como en el caso I. Se desea calcular la magnitud de la resistencia mínima dinámica NW.

Esto es simplemente dado por la Ec. 2.13' como:

$$NW = W \operatorname{sen} (\phi - \gamma) = W \operatorname{sen} (40^\circ - 30^\circ) = W \operatorname{Sen} 10^\circ$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$N = \operatorname{sen} 10^\circ = 0.174$$

Nota: En este caso se recomienda tomar medidas de drenaje para disminuir la presión hidráulica y con esto lograr la estabilidad del macizo rocoso; en el capítulo IV se presentan ejemplos de estos sistemas.

Caso VI

Considérese el talud sometido sólo a peso propio como en el caso I. Se desea calcular la magnitud de la resistencia mínima dinámica NW.

Esto es simplemente dado por la Ec. 2.13' como:

$$NW = W \operatorname{sen} (\phi - \gamma) = W \operatorname{sen} (40^\circ - 30^\circ) = W \operatorname{Sen} 10^\circ$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$N = \operatorname{sen} 10^\circ = 0.174$$

III.2. Ejemplos de problemas para dos planos de falla
trabajados por análisis Vectorial.

Problema 1

Determine el factor de seguridad de la cuña de roca OBCD. (fig. 3.1). También estimar la dirección y magnitud de la resistencia mínima dinámica NW, la cual es necesaria para hacer deslizar el bloque.

Plano 1	Plano 2
$\beta_1 = 36^\circ$	$\beta_2 = 94^\circ$
$\gamma_1 = 62^\circ$	$\gamma_2 = 121^\circ$
$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_2 = 40^\circ$
$\alpha = 70^\circ \quad \delta = 20^\circ$	

Solución:

Factor estático de seguridad contra deslizamiento.

De acuerdo con las ecuaciones A,B y C para el plano 1 tenemos:

$$\bar{u}_1 = \text{Cos } \beta_1 \text{ i} + \text{Sen } \beta_1 \text{ j} + 0 \text{ k} \dots\dots\dots (A)$$

$$\bar{u}_1 = \text{Cos } 36^\circ \text{ i} + \text{Sen } 36^\circ \text{ j} + 0^\circ \text{ k}$$

$$\bar{u}_1 = 0.809 i + 0.588 j + 0 k$$

$$\bar{v}_1 = \cos \gamma_1 \operatorname{Sen} \beta_1 i - \cos \gamma_1 \cos \beta_1 j - \operatorname{Sen} \gamma_1 k \dots\dots\dots (B)$$

$$\bar{v}_1 = \cos 62^\circ \operatorname{Sen} 36^\circ i - \cos 62^\circ \cos 36^\circ j - \operatorname{Sen} 62^\circ k$$

$$\bar{v}_1 = 0.276 i - 0.380 j - 0.883 k$$

$$\bar{n}_1 = \bar{u}_1 \times \bar{v}_1 \dots\dots\dots (C)$$

$$\bar{n}_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0.809 & 0.588 & 0.000 \\ 0.276 & -0.380 & -0.883 \end{vmatrix} = -0.519 i + 0.714 j - 0.469 k$$

Análogamente para el plano 2 tenemos:

$$\bar{u}_2 = -0.070 i + 0.998 j + 0.000 k$$

$$\bar{v}_2 = -0.514 i - 0.036 j - 0.857 k$$

$$\bar{n}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -0.070 & 0.998 & 0.000 \\ -0.514 & -0.036 & -0.857 \end{vmatrix} = -0.855 i - 0.06 j + 0.515 k$$

$$\bar{n}_2 = -0.855 i - 0.060 j + 0.515 k$$

La única carga que entra en el cálculo de este problema es el peso \bar{W} de la cuña de roca OB CD, actuando verticalmente hacia abajo en la dirección $-z$. De esta manera la fuerza resultante \bar{R} puede ser expresada como :

$$\bar{R} = 0 i + 0 j - W k$$

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_1 = 0.469 W > 0$$

$$y \quad \Rightarrow \quad (2.14)$$

$$\bar{R} \cdot \bar{n}_2 = -0.515 W < 0$$

De esta manera, como no se cumplen las desigualdades 2.14, entonces no ocurre la pérdida del contacto entre la cuña y los planos de falla.

$$\bar{x}_{12} = \bar{n}_2 \times \bar{n}_1 = -0.340 i - 0.669 j - 0.642 k$$

$$y \quad |\bar{x}_{12}| = 0.987$$

$$\bar{b}_1 = \bar{x}_{12} \times \bar{n}_1 = 0.772 i + 0.174 j - 0.590 k$$

$$y \quad \Rightarrow \quad (2.16)$$

$$\bar{b}_2 = \bar{x}_{12} \times \bar{n}_2 = -0.383 i + 0.724 j - 0.552 k$$

$$\vec{R} \cdot \vec{b}_1 = 0.590 \quad W > 0 \quad (2.17)$$

$$\vec{R} \cdot \vec{b}_2 = 0.552 \quad W > 0 \quad (2.18)$$

$$\epsilon_x = \tan^{-1} \left(\frac{x_{12z}}{x_{12y}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-0.642}{-0.669} \right) = 43.82^\circ \quad (2.19)$$

Por lo tanto $\delta < \epsilon_x < \alpha$

Así, de acuerdo a las ecs. 2.16 y 2.17 el deslizamiento es cinemáticamente posible únicamente a lo largo de la línea de intersección \vec{x}_{12} . Como $\vec{R} \cdot \vec{x}_{12} = 0.642 \quad W > 0$, entonces el deslizamiento será hacia abajo.

$$\left| \frac{\vec{T}_{12}}{|\vec{x}_{12}|} \right| = \frac{\vec{R} \cdot \vec{x}_{12}}{|\vec{x}_{12}|} = \frac{0.642W}{0.987} = 0.650 \quad W \quad (2.28)$$

y

$$\vec{T}_{12} = 0.650W \frac{\vec{x}_{12}}{|\vec{x}_{12}|} = -0.224W \vec{i} - 0.440W \vec{j} - 0.423W \vec{k} \quad (2.29)$$

$$\vec{N}_{12} = \vec{R} - \vec{T}_{12} = 0.224W \vec{i} + 0.440W \vec{j} - 0.577W \vec{k} \quad (2.30)$$

$$= \left| \vec{N}_1 \right| \vec{n}_1 + \left| \vec{N}_2 \right| (-\vec{n}_2) \quad (2.31)$$

$$= \left| \vec{N}_1 \right| (-0.519\vec{i} + 0.714\vec{j} - 0.469\vec{k}) + \left| \vec{N}_2 \right| (-0.855\vec{i} - 0.060\vec{j} + 0.515\vec{k})$$

Resolviendo el sistema tenemos: $\left| \vec{N}_1 \right| = 0.566 W$; $\left| \vec{N}_2 \right| = 0.605 W$

$$F.S. = \frac{N_1 \tan \varphi_1 + N_2 \tan \varphi_2}{\left| \vec{T}_{12} \right|} \quad (2.35)$$

$$F.S. = \frac{0.566 W \tan 20^\circ + 0.605 W \tan 40^\circ}{0.650 W} = 1.10$$

∴ Como $F.S. > 1$ se tiene equilibrio estable.

Resistencia Mínima Dinámica.

El vector unitario \vec{r}_1 en la dirección de la reacción resultante en el plano 1 es dado por la ec. 2.36 como :

$$\vec{r}_1 = \frac{-\vec{n}_1 \cos \varphi_1 - \vec{x}_{12} \sin \varphi_1}{\left| \vec{x}_{12} \right|} \quad (2.36)$$

$$\vec{r}_1 = 0.605 \vec{i} - 0.440 \vec{j} + 0.664 \vec{k}$$

El vector unitario \bar{r}_2 en la dirección de la reacción resultante en el plano 2 puede ser obtenido de manera similar de la ecuación 2.37

$$\bar{r}_2 = -0.434 i + 0.390 j + 0.812 k \quad (2.37)$$

El vector unitario en la dirección de la resistencia mínima dinámica del vector \bar{NW} es entonces dado por:

$$\bar{n} = \frac{\bar{r}_1 \times \bar{r}_2}{|\bar{r}_1 \times \bar{r}_2|} = -0.619 i - 0.784 j + 0.045 k \quad (2.38)$$

La magnitud de la resistencia mínima dinámica es ahora obtenida como :

$$NW = \text{ABS} (R \cdot \bar{n}) = \text{ABS} (-0.045W) = 0.045 W \quad (2.39)$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$\boxed{N = 0.045} \quad (2.40)$$

El vector unitario \vec{r}_2 en la dirección de la reacción resultante en el plano 2 puede ser obtenido de manera similar de la ecuación 2.37

$$\vec{r}_2 = -0.434 i + 0.390 j + 0.812 k \quad (2.37)$$

El vector unitario en la dirección de la resistencia mínima dinámica del vector \vec{NW} es entonces dado por:

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|} = -0.619 i - 0.784 j + 0.045 k \quad (2.38)$$

La magnitud de la resistencia mínima dinámica es ahora obtenida como :

$$NW = \text{ABS} (R \cdot \vec{n}) = \text{ABS} (-0.045W) = 0.045 W \quad (2.39)$$

Dividiendo entre W tenemos:

$$\boxed{N = 0.045} \quad (2.40)$$

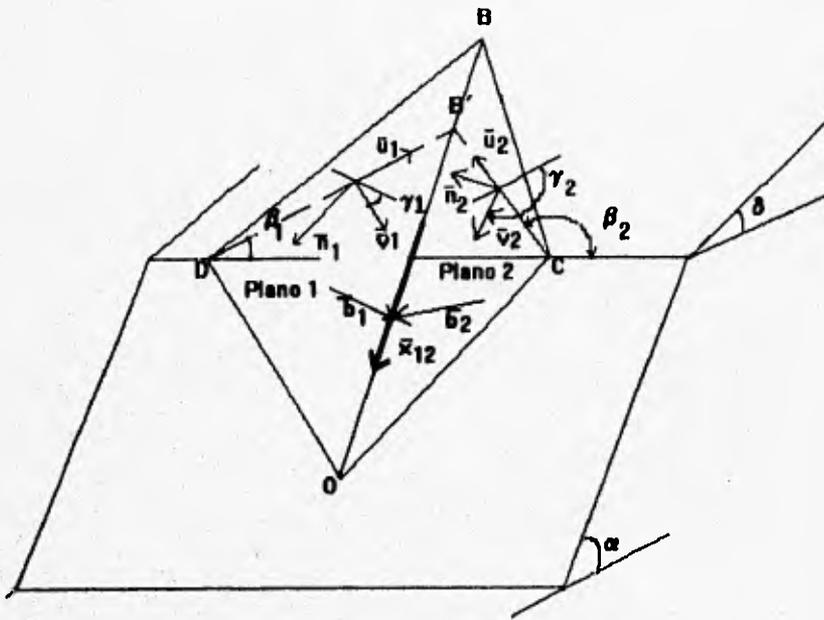


FIG. 3.1. ESTABILIDAD DE UNA CUÑA DE ROCA LIMITADA POR DOS PLANOS DE UNIÓN.

Problema 2

Determine el factor de seguridad de la cuña de roca OBCD sometida sólo a peso propio (fig. 3.2).

Plano 1

$$\varphi_1 = 30^\circ$$

$$\beta_1 = 17^\circ$$

$$\gamma_1 = 60^\circ$$

Plano 2

$$\varphi_2 = 30^\circ$$

$$\beta_2 = 63^\circ$$

$$\gamma_2 = 80^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ \quad \delta = 0^\circ$$

Solución:

Factor Estático de seguridad contra deslizamiento.

Para el plano 1

$$\bar{u}_1 = \cos \beta_1 i + \sin \beta_1 j + 0 k \dots\dots\dots (A)$$

$$\bar{u}_1 = \cos 17^\circ i + \sin 17^\circ j + 0^\circ k$$

$$\bar{u}_1 = 0.956 i + 0.292 j + 0 k$$

$$\bar{v}_1 = \cos \gamma_1 \sin \beta_1 i - \cos \gamma_1 \cos \beta_1 j - \sin \gamma_1 k \dots\dots\dots (B)$$

$$\bar{v}_1 = \cos 60^\circ \operatorname{Sen} 17^\circ i - \cos 60^\circ \cos 17^\circ j - \operatorname{Sen} 60^\circ k$$

$$\bar{v}_1 = 0.146 i - 0.478 j - 0.866 k$$

$$\bar{n}_1 = \bar{u}_1 \times \bar{v}_1 \dots\dots\dots (C)$$

$$\bar{n}_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0.956 & 0.292 & 0.000 \\ 0.146 & -0.478 & -0.866 \end{vmatrix} = -0.253 i + 0.828 j - 0.500 k$$

Análogamente para el plano 2 tenemos:

$$\bar{u}_2 = 0.454 i + 0.891 j + 0.000 k$$

$$\bar{v}_2 = 0.155 i - 0.079 j - 0.985 k$$

$$\bar{n}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0.454 & 0.891 & 0.000 \\ 0.155 & -0.079 & -0.985 \end{vmatrix} = -0.877 i + 0.447 j - 0.174 k$$

$$\bar{n}_2 = -0.878 i + 0.447 j - 0.174 k$$

$$\bar{R} = 0 i + 0 j - W k$$

Donde W es el peso de la cuña OBCD

$$\vec{x}_{12} = n_2 \times n_1 \quad (2.16)$$

$$\vec{x}_{12} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -0.878 & 0.447 & -0.174 \\ -0.253 & 0.828 & -0.500 \end{vmatrix} = -0.080 i - 0.395 j - 0.614 k$$

$$\vec{x}_{12} = -0.080 i - 0.395 j - 0.614 k$$

$$|\vec{x}_{12}| = 0.734$$

$$b_1 = x_{12} \times n_1 = 0.705 i + 0.115 j - 0.166 k \quad \Rightarrow \quad (2.16)$$

$$b_2 = x_{12} \times n_2 = 0.343 i + 0.524 j - 0.382 k$$

$$R \bullet b_1 = 0.166 W > 0 \quad (2.17)$$

$$R \bullet b_2 = 0.382 W > 0 \quad (2.18)$$

$$\alpha_x = \tan^{-1} \left(\frac{x_{12z}}{x_{12y}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-0.614}{-0.395} \right) = 57.24^\circ \quad (2.19)$$

Por lo tanto $\delta < \epsilon_x < \alpha$

Así de acuerdo a la ecuación 2.16 y la desigualdad 2.17 el deslizamiento es cinemáticamente posible sólo a lo largo de la línea de intersección \bar{x}_{12} .

En tanto que $\bar{R} \cdot \bar{x}_{12} = 0.614 W > 0$, el deslizamiento tiende a ocurrir hacia abajo.

$$|\bar{T}_{12}| = \frac{\bar{R} \cdot \bar{x}_{12}}{|\bar{x}_{12}|} = \frac{0.614W}{0.734} = 0.836 W \quad (2.28)$$

y

$$\bar{T}_{12} = 0.836 W \frac{\bar{x}_{12}}{|\bar{x}_{12}|} = -0.091W i - 0.450W j - 0.699W k \quad (2.29)$$

$$\bar{N}_{12} = \bar{R} - \bar{T}_{12} = 0.091W i + 0.450W j - 0.301W k \quad (2.30)$$

$$= |\bar{N}_1| \bar{n}_1 + |\bar{N}_2| (-\bar{n}_2) \quad (2.31)$$

$$= |\bar{N}_1| (-0.253i + 0.828j - 0.499k) + |\bar{N}_2| (+0.877i - 0.447j + 0.174k)$$

Resolviendo el sistema tenemos: $|\bar{N}_1| = 0.709 W$; $|\bar{N}_2| = 0.308 W$

$$F.S. = \frac{|\bar{N}_1| \tan \varphi_1 + |\bar{N}_2| \tan \varphi_2}{|\bar{T}_{12}|} \quad (2.35)$$

$$F.S. = \frac{0.709 W \tan 30^\circ + 0.308 W \tan 30^\circ}{0.836 W} = 0.703$$

∴ Como $F.S. < 1$ se tiene equilibrio inestable.

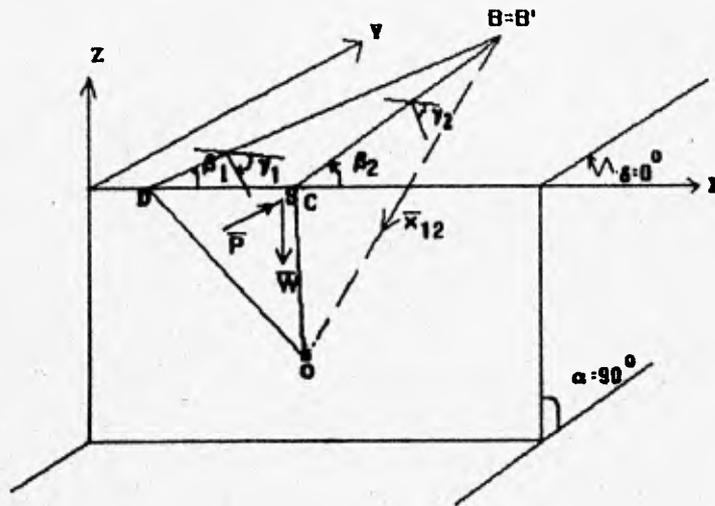


FIG. 3.2. ESTABILIDAD DE UNA CUÑA DE ROCA LIMITADA POR DOS PLANOS DE UNIÓN.

C A P Í T U L O I V

**ASPECTOS GENERALES SOBRE LA PRACTICA DE LAS EXCAVACIONES A
CIELO ABIERTO**

**ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE UNA CUÑA DE ROCA INESTABLE EN LA
PRESA EL CARACOL**

Durante la construcción del proyecto hidroeléctrico "El Caracol", localizado a lo largo del río balsas en el Estado de Guerrero, México, que se encuentra en una zona altamente sísmica, fue necesario construir la casa de máquinas para los transformadores, debajo de la superficie natural del terreno, donde se encontró que el macizo rocoso estaba constituido por roca sedimentaria, piedra arenosa y arcilla. Otras características de la roca son el plegamiento y la fracturación.

Problemas de estabilidad fueron detectadas durante la etapa de excavación, inicialmente debido a la estratificación de la roca y subsecuentemente debido a la presencia de dos fallas que se intersectaban.

Localización y geología del sitio de la presa.

El proyecto hidroeléctrico "El Caracol" está localizado en el río Balsas en el Estado de Guerrero y aproximadamente a unos 250 Km., al suroeste de la ciudad de México. Esta región del país ha sido considerada como una zona altamente sísmica.

La emergencia de la roca a la superficie corresponde a formaciones sedimentarias del cretáceo y terciario; las cuales están sumamente plegadas y fracturadas debido a presiones tectónicas.

En el sitio de la presa la roca está formada por areniscas y arcillas, mostrando una serie de pliegues con inclinación dominante hacia el oeste. Fueron detectadas cuatro series de fracturas que afectan la masa de roca, estas están predominantemente cerradas, con cuarzo o calcita. La serie de fracturas a lo largo de la dirección Este-Oeste es la más notable debido a su frecuente aparición.

Problemas encontrados durante la excavación.

El proceso de excavación comenzó en 1981 a una elevación de 580m aproximadamente. Cuando los primeros 30m habian sido excavados, se observaron problemas locales de estabilidad en el bloque, por lo que se decidió modificar la inclinación del talud tratando de conservar su orientación paralela a los

planos de los estratos. Un estudio subsecuente proporcionó una información geológica más detallada, mostrando que si la orientación de los taludes a ser excavados era cambiada a un ángulo de 16° , los problemas de estabilidad de la zona correspondientes a un segundo bloque podían ser eliminados en una buena parte del talud.

Sin embargo debido a la geometría de la excavación en la porción central, los planos de los estratos serían interceptados de manera favorable.

Se decidió entonces a proceder con la excavación del talud adoptando la modificación de la inclinación del corte y tomando en cuenta que esas partes donde la inclinación del estrato alrededor de la excavación sería estabilizado por medio de anclas, drenaje y protección de la superficie.

Alternativas de solución:

- a) Cambiar la localización de la plataforma para los transformadores a un nuevo sitio en la cúspide del risco, a una elevación de 570 m.

- b) Conservar la plataforma originalmente proyectada a una elevación de 485m. pero construir una estructura de concreto para proteger las instalaciones eléctricas contra

posibles deslizamientos de la roca durante la operación de la planta.

- c) Remover la cuña de roca contenida entre las fallas.
- d) Disminuir el peso de la cuña por medio de la excavación de la parte alta y complementar su estabilización con anclas, drenaje y tratamiento de la superficie.

La estabilidad de la cuña fue analizada con un método tridimensional y de los resultados obtenidos fue posible plantear algunas propuestas para su estabilización.

La solución adoptada contempló la remoción de 35,000 toneladas de roca de la parte de arriba de la cuña y la colocación de 180 anclas de fricción con una capacidad de 100 toneladas cada una y longitudes que fluctúan entre 12 y 37 metros, complementado por un sistema de drenaje en la superficie y de una galería localizada bajo el bloque inestable.

Siguiendo un programa de estudios geológicos y alternativas de diseño, se decidió instalar la plataforma para los transformadores a una elevación de 45m sobre la caverna, dentro de la casa de máquinas.

Instrumentación.

Con el objeto de monitorear continuamente el comportamiento de la cuña, se utilizaron 2 sistemas de instrumentación para cuantificar los desplazamientos.

El primero consistió en colocar tres series de extensómetros localizados a lo largo de un eje vertical a diferentes elevaciones, cada grupo formado por 3 extensómetros separado aproximadamente 7m. con el punto de anclaje, por debajo del plano de deslizamiento.

El segundo a base de levantamientos topográficos llevados a cabo en la superficie con puntos de referencia colocados en la zona de la cuña.

Conclusiones.

Para el estudio de la complejidad geológica de las masas de roca, como el del caso presentado, la mecánica de rocas juega un papel importante durante la etapa de construcción, verificando que las suposiciones preliminares adoptadas para el diseño son satisfechas y si no, por el análisis de la información geológica disponible de manera de implementar las medidas necesarias que garanticen la estabilidad del talud.

Deslizamiento por traslación en terreno estratificado. (*)

Como ejemplo del análisis de una falla de traslación en terreno estratificado es el caso que se presentó en la margen izquierda del sitio donde se proyectó la construcción de la presa Chicoasén sobre el río Grijalva, México.

La zona bajo estudio forma parte del flanco oriental de un anticlinal, truncado por una falla regional al norte y otra falla local al sur. La boquilla está labrada en formaciones sedimentarias de calizas del Cretáceo superior y de lutitas del Eoceno; en promedio tiene una capa de lutita de 1 a 3 cm de espesor cada 3m aproximadamente.

La estructura está representada por un plano inclinado de aguas abajo hacia aguas arriba y de la margen izquierda hacia la margen derecha. La inclinación de las capas varía de 15 a 38°, con una inclinación principal de 24°.

(*) Alberro, J, "Propiedades mecánicas de las rocas", cap 16 del libro Presas de Tierra y Rocamiento, de Marsal, R J y Reséndiz, D, Limusa, 1975.

Con objeto de determinar el factor de seguridad contra deslizamiento de una sección compuesta por varias dovelas, se utilizó la expresión:

$$F.S. = \frac{\text{Suma de las fuerzas tangenciales resistentes}}{\text{Suma de las fuerzas tangenciales actuantes}}$$

En la que ambos sistemas de fuerzas actúan en la superficie de falla.

Para cada una de las secciones analizadas se consideraron los siguientes casos:

- a) No hay agua en el embalse.
- b) El nivel de agua en el embalse corresponde al nivel de aguas máximas extraordinarias.
- c) Se presenta un vaciado rápido, con abatimiento del nivel de agua en el embalse de la elev. 375 a la 350.

Dichas posibilidades se revisaron tomando en cuenta los efectos de un sismo de aceleración c igual a 0.3 g.

De acuerdo con la información actual acerca de la resistencia residual de las lutitas del sitio, resulta que la zona se

encuentra en equilibrio crítico para condiciones de vaciado rápido, o en caso que se presente un sismo de gran intensidad.

Deslizamiento por traslación de un bloque analizado tridimensional, limitado por planos de debilidad. (*)

A continuación se presenta el estudio de la estabilidad de las márgenes rocosas de la presa **La Angostura, México**, cuya cimentación está formada por depósitos sedimentarios de calizas con intercalación de lutitas de espesores variables. En las cercanías del sitio el echado de los estratos de caliza es de 9° y su rumbo N 48° W.

Mediante levantamientos geológicos superficiales se comprobó la existencia, en ambas márgenes, de tres familias de fracturas verticales que limitan tetraedros cuya estabilidad es objeto de análisis.

La estabilidad de los tetraedros limitados por dos fracturas verticales, un plano de debilidad con echado de 9° y la superficie libre del terreno se analizó con base en las siguientes hipótesis:

(*) Alberro, J, "Propiedades mecánicas de las rocas", cap 16 del libro **Presas de Tierra y Rocamiento**, de Marsal, R J y Reséndiz, D, Limusa, 1975.

a) Las fracturas verticales quedan abiertas desde la superficie libre del terreno hasta el lecho del río. Se ha podido comprobar, mediante socavones, que las fracturas tienen tendencia a cerrarse conforme aumenta el espesor del material suprayacente. La hipótesis utilizada es conservadora.

b) La resistencia al corte en las caras del tetraedro es puramente friccionante. De acuerdo con los resultados de pruebas de corte directo efectuadas *in situ*, el mínimo ángulo de fricción (resistencia residual) de los estratos de lutita es igual a 15° y este valor fue el que se adoptó para el análisis.

c) Las discontinuidades geológicas forman una red de canales verticales que permiten la circulación del agua.

A continuación se presentan los resultados del análisis de la estabilidad de la cuña, localizada aguas abajo de la presa. Considerando los diferentes valores u_1 , u_2 y u_3 correspondientes a diversas condiciones, resulta que:

a) Si no llueve en la zona y el embalse está lleno, las presiones del agua en las caras de la cuña, de acuerdo con los datos son nulas, o sea $u_1=u_2=u_3=0$. La cuña permanece en equilibrio.

b) Si el embalse se encuentra lleno y está lloviendo en la zona, por efecto de la precipitación las presiones del agua en las caras de la cuña pueden alcanzar valores $u_1=u_2=u_3=1$. En tal caso la cuña falla, pues el ángulo de fricción ϕ_3 necesario para asegurar el equilibrio es igual a 60° .

La experiencia demuestra que las lluvias normales en la zona no han ocasionado la falla de esta cuña, por lo cual se supone que no son suficientemente intensas para dar lugar a la condición $u_1=u_2=u_3=1$.

c) Al derramar las excedencias el vertedor, la lluvia artificial generada por la disipación de energía al caer la masa de agua al lecho del río puede alimentar las discontinuidades geológicas que limitan el bloque analizado en forma más desfavorable que las lluvias normales, En tal caso se producirá la falla de la cuña. Se observa la influencia de la presión u_2 en las condiciones de equilibrio de la cuña. Las presiones u_1 y u_2 pueden variar de cero a uno manteniendo la presión u_2 constante sin que el ángulo de fricción ϕ_3 necesario para asegurar el equilibrio varíe notablemente. Esto implica que para asegurar el equilibrio de la cuña analizada, el drenaje de la cara 2 es fundamental. Se recomendó, en consecuencia, sellar la fractura 2 en la superficie del terreno y drenar el plano de la discontinuidad 2 con objeto de favorecer el equilibrio de esta cuña.

Sistemas de drenaje en taludes

En la práctica se puede suponer que no hay pérdida de carga hidráulica hasta las dos terceras partes de altura de la cuña, y que a partir de este nivel, la pérdida de presión es lineal hasta llegar a cero, en la salida del agua al pie de la cuña.

Cuando el factor de seguridad es menor que al preestablecido, se hace necesario estabilizar el talud. Una forma muy socorrida es la de utilizar sistemas de drenaje.

El propósito de las medidas de drenaje consiste en disminuir la subpresión del agua, mediante la instalación de drenes transversales de penetración, galerías filtrantes, etc. También se deben tomar medidas de drenaje superficial, mediante la construcción de cunetas, contracunetas, zanjas, etc. con el propósito de evitar la infiltración de agua en las fisuras del macizo rocoso. En la figura 4.1 se muestran los sistemas de drenaje más usuales.

Anclaje en taludes

En la figura 4.2 se muestra un sistema de soporte de taludes a base de anclas de tensión postensadas y barrenos de drenaje. En el diseño de este anclaje se ha tomado en cuenta el empuje hidrostático, el efecto de sismo y el soporte de los depósitos del río.

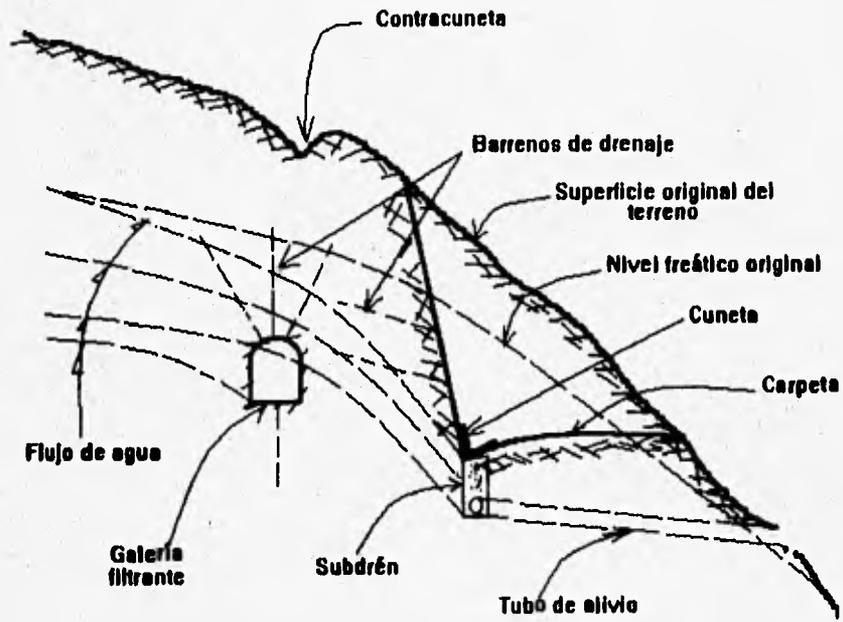
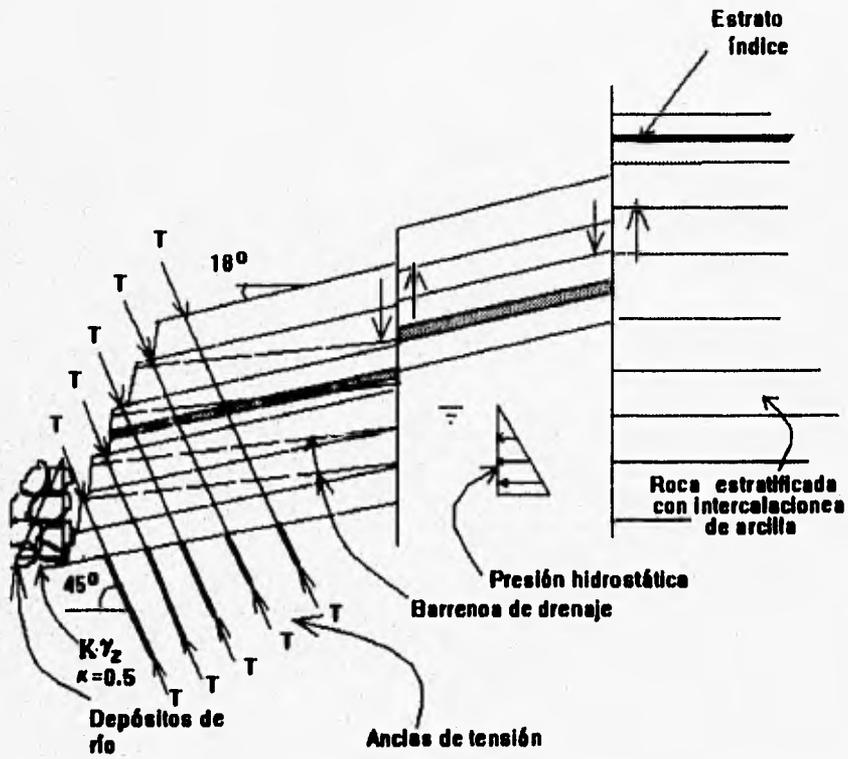


FIGURA 4.1 SISTEMAS DE DRENAJE EN TALUDES



4.2 TALUD SOPORTADO CON ANCLAS DE TENSION EN ROCA ESTRATIFICADA

En la tabla No. 1 se presentan algunos valores aproximados del ángulo de fricción interna en las discontinuidades de algunas rocas, cabe mencionar que estos valores se deberán tomar exclusivamente para análisis previos, más no para el diseño final de la obra, ya que para llegar al diseño final se tendrán que hacer pruebas en campo para conocer bien el valor de dicho ángulo.

Tabla No. 1

Valores del ángulo de fricción interna en las discontinuidades del macizo rocoso (grados).

Yeso	29
Caliza compacta	28 a 45
Basalto	31
Marga	25
Limolita	32
Lutita	14 a 22
Lutita bentonítica	8
Cuarcita	48
Pizarra	7 a 27
Roca dolomítica	36
Creta	32
Gneiss esquistoide	28

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

El análisis de la estabilidad de un macizo rocoso consta de tres elementos fundamentales:

a) Obtención de las características geométricas y mecánicas del macizo.

La característica más importante de los macizos rocosos es que en general están surcados por discontinuidades, tales como juntas, fracturas, fallas, planos de estratificación, superficies de foliación, etc.

Las causas de las discontinuidades son varias. Entre ellas están el enfriamiento de las rocas magmáticas, los esfuerzos tectónicos, los esfuerzos de tensión en acantilados, etc. En las rocas sedimentarias los planos de estratificación son superficies de debilidad que hacen discontinua a la roca.

La foliación de algunas rocas metamórficas las hacen altamente discontinuas.

Es primordial tener los datos con los que se trabajará mas adelante en el proceso de cuantificación del problema, como son:

- Levantamiento geológico de las discontinuidades del macizo rocoso.
 - Ángulo de fricción entre las juntas o planos de estratificación.
 - Análisis del flujo de agua a través del macizo rocoso.
 - Fuerzas sísmicas
 - Sobrecargas
 - Etc.
- b) Idealización del problema analizado.

Teniendo los datos del inciso anterior, se puede idealizar el comportamiento del macizo rocoso bajo el efecto de las cargas impuestas, debiéndose de definir mecanismos de falla que sean cinematicamente posibles, de acuerdo con la configuración geométrica de las discontinuidades de la masa.

c) Análisis cuantitativo de la estabilidad.

Existen diferentes métodos analíticos para determinar la estabilidad de un talud, pero el utilizado en esta tesis es el que desarrolla Wittke y Londe, en donde la esencia del cálculo es determinar el Factor de Seguridad que resulta del cociente de las fuerzas resistentes entre las fuerzas actuantes y según este resulte mayor o menor que uno, el talud es estable o no.

Existe en la mecánica de rocas el método gráfico para calcular la estabilidad de un macizo rocoso, pero como cualquier método gráfico presenta algunos errores por la medición, mientras que con el método analítico vectorial se obtienen resultados más precisos, dando valores más acertados, disminuyendo en parte la incertidumbre proviene de los datos de campo.

Otra ventaja que tiene el método analítico sobre el gráfico es que se puede programar en la computadora ó en calculadoras programables, por lo que se realizan cálculos más rápidos.

En la práctica se recomienda verificar el estado de las fisuras después de la utilización de explosivos en el macizo rocoso, ya que se puede estar en una situación en donde las propiedades mecánicas (ángulo de fricción) cambien desfavorablemente en comparación con las que se obtuvieron en la etapa de proyecto, y poder llegar a situaciones de inestabilidad, aun cuando en el análisis se presentó un factor de seguridad mayor a la unidad.

Cabe destacar que entre los metodos más usados en la práctica para estabilizar un talud, se emplean anclas y sistemas de drenaje.

BIBLIOGRAFIA

A. J. Hendron, Jr. E. J. Cording A. K. Aiyer. **Analytical and graphical methods for the analysis of slopes in rock masses.** EUA. University of Illinois, 1971. 150 p.p.

Marsal, R. J. y Reséndiz, D. **Presas de Tierra y Enrocamiento.** Edit. Linusa, 1975.

Demeneghi Colina, Agustin. **Apuntes de Mecánica de Rocas.** México, 1994, 65 p.p.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. **Simposio: La mecánica de rocas en México.** México. 1982, 510 p.p.

Cuellar Borja, Raúl. **Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos. Métodos Preventivos y Correctivos.** México, Agosto, 1978. Edit. F.I. U.N.A.M. Centro de Educación Continua.

**ESTA TESIS NO DEBE
QUEDAR DE LA BIBLIOTECA**