

# ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MINAS A CIELO ABIERTO

Por: David Córdova R. y  
Alfredo Laos V.

*La minimización de costos de operación es un gran incentivo para excavar taludes lo más escarpados posibles, de aquí que la estabilidad de éstos es importante.*

*Se describen los procedimientos y técnicas básicas para evaluar la estabilidad de taludes en roca. Se enfocan en primer lugar generalidades sobre objetivos y metodología, luego aspectos referentes a estudios geológicos estructurales, propiedades mecánicas del macizo rocoso y medidas de esfuerzos y deformaciones, análisis de estabilidad y, finalmente aplicamos un método tridimensional de la posibilidad de falla de un talud para demostrar como pueden ser utilizados los parámetros que gobiernan la estabilidad. Por ahora, no se han descrito técnicas para abordar problemas de agua subterránea y vibraciones sísmicas, no obstante ser factores importantes.*

## INTRODUCCION

Actualmente en nuestro país hay varias minas a cielo abierto tanto en etapa de producción como en pre-producción, así mismo existen muchos proyectos de futuras operaciones mineras en diversos estados de desarrollo.

En los últimos años la estabilidad de taludes ha demostrado tener una gran influen-

cia en los beneficios económicos de una mina especialmente en depósitos de baja ley como es el caso del cobre en nuestra patria, los análisis de sensibilidad muestran que la determinación de los ángulos de taludes son el tercer criterio más importante en el diseño y planeamiento del tajo, por lo tanto se hace imperiosa la necesidad de realizar estudios conducentes a éste fin, ya que pequeñas variaciones en dicho ángulo o deslizamiento de material rocoso podrían afectar muy significativamente al proyecto.

Hoy en día, existe un conocimiento y experiencia muy extensa disponible para determinar ángulos de taludes realistas así como para controlar su estabilidad, con un grado aceptable de certeza, y en este trabajo aportamos parte de ese conocimiento en base a la experiencia adquirida como participantes en estudios de éste tipo en las minas Cala y Río Tinto (España).

## **OBJETIVO**

Los estudios de estabildades de taludes se llevan a cabo con la finalidad de diseñar la geometría más óptima que debe presentar una mina a cielo abierto, logrando un doble objetivo:

1.—La elección de un perfil lo más empinado posible que, dentro de unos márgenes razonables de seguridad reduzca los costos de operación.

2.—El control estricto de dicho perfil que evite ó prevea deslizamiento o caída de material rocoso a medida que avance y una vez finalizada la excavación.

El perfil de una mina está definido por 3 tipos de taludes: de banco, de operación y talud final. El talud de banco es controlado parcialmente por las condiciones de operación y si bien la falla de éstos no son catastróficas se deben evitar en lo posible. El talud de operación en la mayoría de las minas varía de 20° a 30°, el incremento de éste ángulo puede mejorar el flujo de caja ya que se remueve menos desmonte en un período de tiempo dado, pero existe la probabilidad de bajar la eficiencia en la operación, por consiguiente un análisis de costos de operación determinará el talud más adecuado. En este caso no hay mayores riesgos de inestabilidad. El talud final es el que determina la geometría de la excavación total a realizarse y por esto es un factor crítico en el diseño del tajo. El factor económico a considerarse para la inclinación óptima es aquel que fija la mínima cantidad de desmonte para remo-

ver el mineral (costo de remoción más bajo) de tal manera que no exista inestabilidad en el talud y por consiguiente daños en la operación.

## **METODOLOGIA**

En la actualidad la mecánica de rocas no define una metodología aceptada universalmente, sinó que ésta depende de cada trabajo específico, de tal manera que se adecue mejor a los intereses del mismo.

Un estudio de estabilidad de taludes combina investigaciones de campo, pruebas de laboratorio y una evaluación teórica en gabinete unidos a un programa integral y continuo de "control del terreno"

En el análisis se deben considerar todos los parámetros que controlan la estabilidad, básicamente estos parámetros se desarrollan en 3 etapas: (5).

### **Etapas I**

Delimitar claramente la geología del talud involucrando una investigación estructural completa para determinar las relaciones espaciales de las discontinuidades.

### **Etapas II**

Determinar las fuerzas que actúan en el talud aquellas debido al peso propio del macizo rocoso (gravedad), a la presión del agua, a los esfuerzos tectónicos residuales y a la carga sísmica creada por la voladura o los temblores.

### **Etapas III**

Evaluar las resistencias disponibles y las deformaciones o desplazamientos permisibles de los diferentes materiales del talud bajo la acción de las cargas definidas en la etapa II.

Lo expuesto nos lleva a pensar que este tipo de estudios necesita del auxilio de otras

ciencias, como la geología estructural, la hidrología, la geodinámica, que, en conjunto forman lo que se ha empezado a llamar la Geomecánica.

## **ESTUDIO GEOLOGICO ESTRUCTURAL**

Es importante en Mecánica de Rocas conocer la situación y orientación de las discontinuidades y fracturas que formando un sistema, persisten bajo una mismas condiciones en un macizo rocoso. De aquí la necesidad de llevar a cabo:

- Un bosquejo geológico que proporcione datos y permita conocer las ocurrencias geológicas de la zona, y
- Un análisis detallado de las discontinuidades que será fundamental en la obtención de conclusiones.

### **BOSQUEJO GEOLOGICO**

Esta información se obtiene de los estudios geológicos que existen en todas las minas. Se pone énfasis en datos concernientes a Mecánica de Rocas como tipos de material, discontinuidades importantes, designación de la calidad de la roca, indicando profundidades de humedad, zonas de corte, etc. los cuales son presentados en planos geológicos y planos de ingeniería geológica.

### **ANALISIS DE DISCONTINUIDADES**

Un análisis de discontinuidades requiere de un estudio previo de la zona con referencia a su futuro movimiento planeado, luego se selecciona un método para la medida de dichas discontinuidades, estos son muchos, generalmente costosos y sofisticados que solo justifican su utilización como complemento de un análisis convencional.

Los métodos con los que estamos familiarizados, y que a la vez son los más comunes y han resultado eficaces hasta el momento son:

1. Método Directo por Líneas (Detail Line) o método convencional y
2. Método fotogramétrico.

### **1. METODO CONVENCIONAL (DETAIL LINE)**

Este método se basa en la medida sistemática de todas y cada una de las fracturas que intersecan a una línea trazada sobre el talud objeto de estudio. Se considera fracturas a las superficies de discontinuidad en la masa rocosa, para cada fractura se toman los siguientes datos:

**ORIENTACION.**— Medida con brújula y determinado por el buzamiento y dirección de buzamiento.

**CONTINUIDAD.**— Estima en metros la longitud de traza de la fractura sobre la superficie del talud.

**LITOLOGIA.**— El tipo de roca en la que se encuentra.

**TIPO DE ESTRUCTURA.**— Es decir los diferentes tipos de superficie de discontinuidad.

**RUGOSIDAD.**— Un estimado de categoría de rugosidad como por ejem. superficies lisas, medias, rugosas etc.

**ONDULACION.**— Estimación de la amplitud y longitud de ondas, en centímetros.

**RELLENO.**— Considerando el tipo de relleno espesor y potencia, si los hay.

Además se consigna la posición en la cual la fractura interseca a la línea de medida y está dada por la distancia a lo largo de dicha línea desde su origen. Esto tiene por finalidad poder calcular posteriormente la distribución espacial de los distintos tipos de fracturas.

Todos estos datos quedan reflejados en fichas o formatos apropiados como puede observarse en la fig. N° (1). Cuando los datos se procesan por computadora se usan códigos de las características de la fractura o códigos de rangos de medidas de estas características. Mediante un análisis estadístico se llegará a clasificar las discontinuidades en "sets" o familias que permitan el estudio de estabilidad mediante la utilización de modelos físicos y matemáticos.

La orientación de las fracturas se lleva a un diagrama estereográfico mediante la representación Lambert-Schmidt de las redes equiareales, esto permite una representación bidimensional clara de las estructuras espaciales al proyectarse el hemisferio inferior de la esfera al plano ecuatorial. Sobre este diagrama se trazan las líneas de insoconcentración de puntos, las zonas de mayor densidad de fractura determinan la posición de los distintos "sets" (fig. N° 2).

Para determinar un set se sigue el siguiente proceso:

1.—Construcción del diagrama estereográfico con un número de datos de fracturas no inferior a 100 tomados en una o más líneas.

2.—Trazado de líneas de isoconcentraciones de puntos para intervalos discretos en tanto por ciento del número total de puntos representados.

3.—Determinar ¿qué fracturas pertenecen o no pertenecen a un "set" dado?; para lo cual se ha establecido los criterios convencionales siguientes:

—Se estima un punto sobre el diagrama en donde hay mayor concentración de polos.

ESTUDIO DE DISCONTINUIDADES

TOMA DE DATOS

SITUACION .....		BANCO .....					LINEA .....				OBSERVACIONES					
DISCONTINUIDAD N° .....	COORDENADAS		C O T A	DISTANCIA (M)	ORIENTACION		R O C A			CONTINUIDAD		SUPERFICIE		RELLENO		
	X	Y			Buz.	Direc. Buz.	Tipo	Dureza	Estruc- tura			Rugosidad	ONDULACION		Tipo	Espesor (cm)
													Long. (cm)	Amplit. (cm)		

Fig. 1

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO

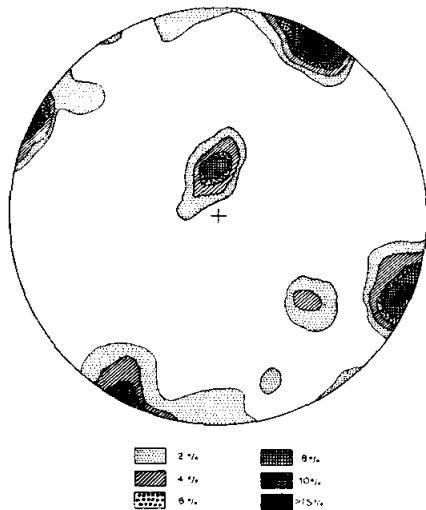


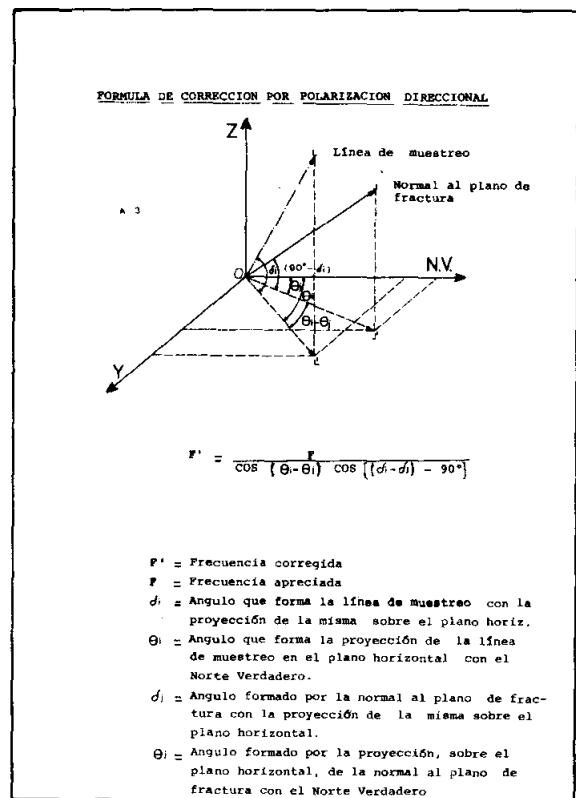
FIGURA 2

- Se establece un entorno alrededor de este punto de forma que incluya al máximo número de datos y con la condición de que ninguna medida se aparte más de 20°, tanto en buzamiento como en dirección de buzamiento del punto tomado como centro. Se infiere que toda fractura de este entorno pertenece al "set".
- Se halla la media estadística de todos los valores incluidos en el intervalo antes descrito tanto para el buzamiento como para la dirección de buzamiento y este valor es considerado como la orientación típica del "set". Además se establecen los siguientes criterios para juzgar la validez estadística de los "set" hallados:
  - Un "set" es considerado como tal cuando recoge al menos un 5% de los datos de fracturas medidas en su línea.
  - Para que una línea se considere formada por un "set" debe tener al menos un 40% del número total de fracturas medidas.

Un análisis de sets mediante diagramas de frecuencias conlleva a construir para cada línea un histograma que representará la variación del número de fracturas/metro al ir moviéndonos a lo largo del talud. Esto se efectúa tanto para el número total de fracturas como para los pertenecientes a cada set, con el fin de observar si en algún punto determinado de cada línea, aparece o desaparece algún "set".

Además los distintos sets se corrigen por polarización direccional (Fig. N° 3) esto es, suponiendo que la línea de medida es perpendicular a la dirección media del set, con vistas a poder establecer la importancia relativa a cada uno.

Según J.E. JENNINGS si el coeficiente de corrección es mayor que 5 no hay confianza en los resultados obtenidos y se asume que el valor de fracturas/metro es mayor que el medido directamente sin corregirlo, pero no se cuantifica con precisión.



Por otro lado, es preciso construir un diagrama esteográfico para el total de fracturas medidas con miras a tener una idea del agrupamiento o dispersión de los datos a fin de estudiar la persistencia de los "sets" a lo largo de toda la zona de estudio.

Asímismo, sobre un diagrama estereográfico (Fig. N° 4) se representan las direcciones medias de los distintos "sets" así como un entorno de su amplitud igual a su desviación estándar que nos proporcionará una idea más clara de la situación preferencial de las fracturas en el espacio.

Presentaremos un esbozo de los resultados correspondientes a los gráficos 2 y 3.

—Dirección de Buzamiento del talud donde se han medido las fracturas  $117^\circ$

—Buzamiento promedio del talud  $75^\circ$

—Longitud total donde han sido medidas las fracturas 150 metros

—Número de fracturas medidas: 132

—Frecuencia 0.88 fract/metro

El diagrama estereográfico muestra la existencia de 3 "sets" principales, Set E<sub>f</sub> perteneciente a la estratificación y sets A<sub>f</sub>, B<sub>f</sub> al fracturamiento y correspondiendo respectivamente a 9.84, 18.18 y 34.09% del total de fracturas medidas. En el diagrama resumen se ha señalado un cuarto set, el set C<sub>f</sub> que está formado por un conjunto de fracturas dispersas que rellenan el intervalo entre los set A y B y que si bien no forman un "set" estricto, su existencia no puede ser ignorada para futuros análisis del talud.

Cada uno de los sets tiene sus propias características orientacionales, así por ejemplo las correspondientes al B<sub>f</sub> (el más importante) son:

#### LIMITES

—Direcc. Buzam.	$180^\circ - 220^\circ$
—Buzamiento	$70^\circ - 90^\circ$
—Direc. Buzam.	$0^\circ \quad 40^\circ$
—Buzamiento	$70^\circ \quad 90^\circ$

#### VALOR MEDIO

—Direc. Buzam.	$204^\circ \quad 20'$
—Buzamiento	$88^\circ \quad 06'$

#### DESVIACION STANDARD

—Direc. Buzam.	$7^\circ \quad 59'$
—Buzamiento	$8^\circ \quad 51'$

Un análisis del área total bajo observación implica un estudio geológico-geométrico de los sets, tanto individualmente como en conjunto, se determinará el promedio de fracturas/metro pertenecientes a cada uno sin corregir y corregido por polarización direccional y se tratará de estimar sus características a fin de sacar conclusiones válidas

DIAGRAMA RESUMEN

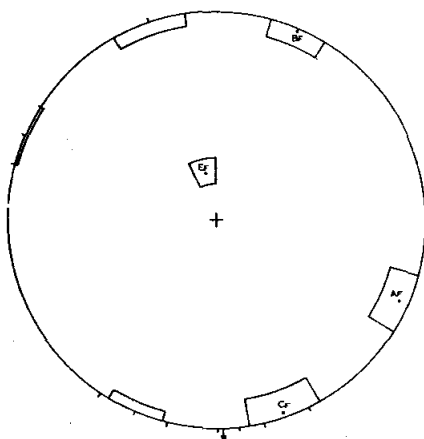


FIGURA 4

como la existencia de regiones estructurales (Volúmenes rocosos de estructuras y calidades similares) y el establecimiento de posibles superficies potenciales de falla, los cuales serán presentados en planos o secciones transversales, Ejm. Fig. N° 5.)

## 2.—METODO FOTOGRAMETRICO

Cuando en una mina hay problemas de magnetismo, el caso más típico, la presencia de magnetita, en la toma de datos estructurales por el método convencional se observan bruscas variaciones en la brújula y es necesario tomar la declinación magnética en diversos puntos de la zona con un teodolito y corregir posteriormente los rumbos a la vista de esta variación. Para obviar este contra tiempo, se está generalizando en la actualidad el método fotogramétrico (también aplicado en la mina Cala) con un amplio campo de posibles ventajas sobre el método convencional.

Fundamentalmente comprende las siguientes fases:

1.—Determinación de las bases fotogramétricas terrestres, a fin de sacar fotogramas desde los extremos y conseguir estereopares traslapados.

2.—Localización y señalización, sobre ampliación fotográfica de los planos de fractura a medir.

3.—Cálculos de coordenadas que definen los planos de fractura, mediante un estereoautógrafo.

4.—Cálculo de parámetros y orientación de planos. Esta se realiza por computadora, que nos proporciona un listado de buzamiento y dirección de buzamiento de los planos medidos.

El análisis de datos obtenidos por este método es lo indicado para el estudio de tipo convencional, todo el trabajo manual que se

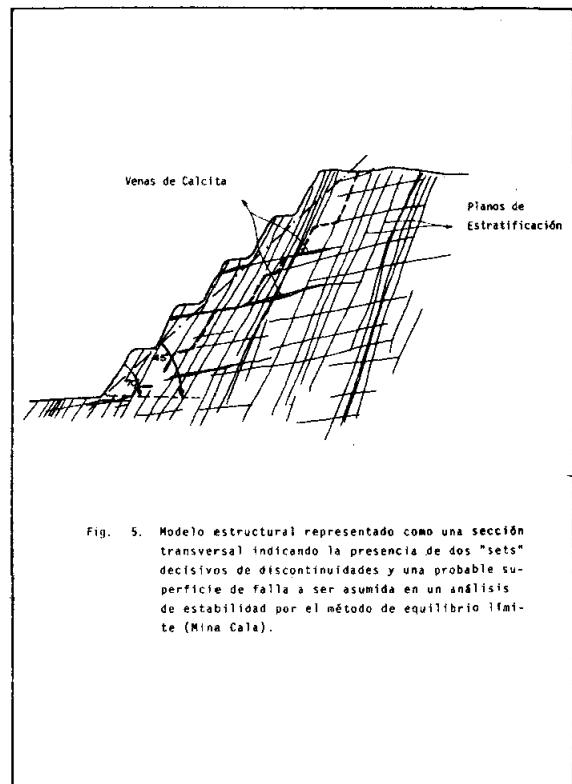


Fig. 5. Modelo estructural representado como una sección transversal indicando la presencia de dos "sets" decisivos de discontinuidades y una probable superficie de falla a ser asumida en un análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite (Mina Cala).

realiza en este estudio es simplificado por programas de computación, como por ejem. el programa GELI, calcula la densidad de polos, realiza rotaciones y halla líneas de intersección de planos; el programa GEOPOL es una versión mejorada de la anterior y lleva en adición análisis estadísticos; el programa SNAP reproduce matemáticamente la técnica manual de preparación de estereogramas: este último es usado por INCITEMI para los estudios de estabilidad de taludes que lleva a cabo.

## PROPIEDADES MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO Y MEDIDA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

Hay necesidad de obtener una información cuantitativa de las propiedades mecánicas de la roca, especialmente de los planos de debilitamiento. A partir de ensayos de

corte directo (a lo largo de planos de discontinuidad de los "sets" de fracturas), ensayos de compresión simple y triaxiales (sobre roca intacta) se llegan a determinar propiedades de la roca como, el ángulo de fricción a lo largo de las superficies de diferentes "sets" de fracturas; los parámetros de resistencia (Envolvente de Mohr) y los módulos elásticos y (Young, Poisson).

Las técnicas de ensayos sobre roca intacta son ampliamente conocidos, concentraremos nuestra atención al ensayo de corte directo sobre discontinuidades, ya que es importante conocer las propiedades friccionales. La figura N° 6 muestra el esquema de una máquina de corte portátil mostrando la posición de la probeta durante el ensayo, y la Figura N° 7 muestra el resultado de un ensayo que llevamos a cabo sobre una probeta extraída de la mina Cala.

Las propiedades friccionales (ángulo de fricción  $\phi$ , cohesión C, resistencia al corte etc) también pueden ser obtenidas a partir del "Back Análisis" o sea de la observación y evaluación de todas y cada una de las fallas ocurridas en los bancos de la mina. Los resultados arrojados por este y los obtenidos por laboratorio indicarán la influencia de las irregularidades de los planos de discontinuidad sobre los valores de fricción.

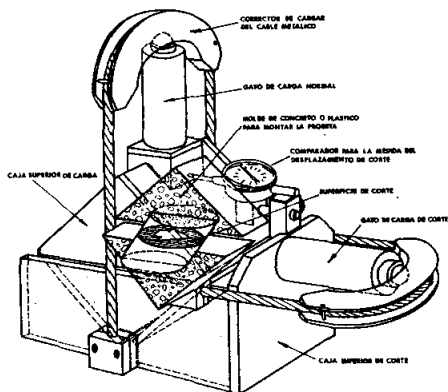


FIG. 6 ESQUEMA DE UNA MÁQUINA DE CORTE PORTÁTIL MOSTRANDO LA POSICIÓN DE LA PROBETA Y LA SUPERFICIE DE CORTE. UNA MÁQUINA TÍPICA TIENE 51 cm DE LONG., 46 cm DE ALTURA Y 39 kg DE PESO

#### ENSAYO DE CORTE DIRECTO

MUESTRA: CALA 5-2 - 5.25 m (diámetro longitudinal)

● CARGA DE ROTURA  
○ CARGA RESIDUAL

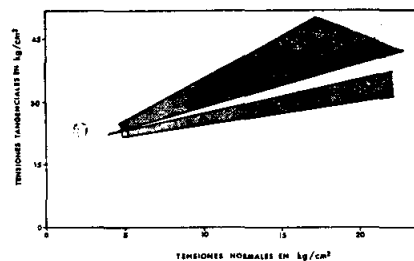
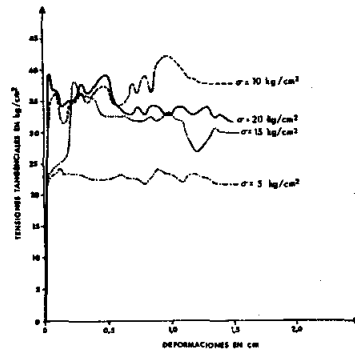


Fig 7

Por otro lado, puede ser de decisiva importancia sobre la estabilidad del talud conocer el estado primario de esfuerzos. El método más adecuado de medir este parámetro es, el de la liberación de esfuerzos por perforación concéntrica usando equipo Doorstoppers, los resultados de estas mediciones serán datos de primer orden en el análisis de estabilidad por elementos finitos.

Finalmente cuando una mina en operación ya tiene perfiles de taludes definidos, especialmente cuando se aproximan al límite final es necesario llevar a cabo un estricto "control del terreno" de tal manera que se evite o prevea deslizamiento de material rocoso, esto se consigue mediante una adecuada instrumentación de campo a fin de realizar medidas de precisión geodésica de cambios de altitud y distancias de puntos fijos de la superficie a lo largo de perfiles del mismo azimut.

Se está generalizando el uso de inclinómetros y extensómetros de varillas de anclaje múltiple, el primero mide deformaciones normales al eje del taladro entubado y por consiguiente los desplazamientos horizontales del terreno y el extensómetro mide desplazamientos a lo largo del eje del taladro instrumentado. Estas mediciones son importantes para el discernimiento de la cinemática del talud y nos demostrará si el modelo de análisis de estabilidad utilizado es realista.

## **ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES**

Un análisis de estabilidad debe satisfacer básicamente dos criterios:

—Que, debe modelar adecuadamente las condiciones reales de la masa rocosa, de modo que pueda ser evaluada la probabilidad de falla, y

—Que la experiencia práctica confirme las predicciones teóricas.

Las técnicas analíticas empleadas estudian la interacción de los parámetros citados en la metodología de tal manera, que pueda ser determinado el grado de estabilidad a partir de un patrón conocido como factor de seguridad.

Los métodos usados en el análisis de estabilidad de taludes están comprendidos dentro de dos modelos principales: Modelos físicos a escala y modelos matemáticos:

### **1.—Modelos Físicos a Escala**

Los ensayos sobre este tipo de modelos proveen un buen método de investigar la posible cinemática del talud, la influencia sobre este comportamiento de los cambios en el ángulo del talud y la deducción de posibles modos de falla, además ayudará a juzgar los resultados del análisis matemático.

El método consiste en construir a base de bloques un modelo físico a escala de tal manera que se asemeje al talud rocoso en verdadera magnitud, (propiedades mecánicas, con-

figuración estructural, fuerzas que actúan en el macizo rocoso, etc.) Sobre este modelo se simula una excavación hasta llegar a la falla del talud, registrándose fotográficamente todo el proceso del ensayo.

En el estudio de estabilidad de la mina Cala se utilizó este método, sin embargo su aplicación en nuestro medio resultaría muy limitado debido principalmente a la no disponibilidad del equipo adecuado y alto costo que demanda su realización.

## **2.—Modelos Matemáticos**

Actualmente son los procedimientos analíticos más prácticos puesto que, proveen una representación adecuada del material rocoso que formó el talud, un alto grado de flexibilidad y un costo de realización relativamente bajo. Son de 2 tipos: Modelos de Análisis de Equilibrio límite y Análisis Esfuerzo/Deformación.

### **a.—Análisis de Equilibrio Límite**

Este análisis hace 2 suposiciones:

1.—Se puede postular una superficie de falla con una geometría tal, que permita tomar lugar al deslizamiento

2.—La distribución de esfuerzos en equilibrio a lo largo de la superficie potencial de falla puede ser calculada conociendo la densidad, presión de agua y carga sísmica.

Aceptadas estas suposiciones, el análisis calcula la resistencia al corte a lo largo de la superficie potencial de falla necesario para mantener al material comprendido entre esta superficie y el perfil del talud en un punto donde el deslizamiento esta cercano a ocurrir. Esta es la condición conocida como Equilibrio Límite.

Si la resistencia al corte calculada en el Equilibrio Límite es igual a la medida de la resistencia al corte disponible, la falla es teóricamente inminente, si la primera es mayor

que la segunda, se producirá la falla y en caso inverso tendremos la condición estable. (Factor de Seguridad  $> 1$ ).

El Factor de Seguridad FS es un índice que controla la comparación de las resistencias disponibles y calculadas. El cálculo de este factor en cada superficie de falla cinemáticamente posible nos mostrará zonas peligrosas ( $FS < 1$ ) y zonas seguras ( $FS > 1$ ) de la geometría del talud.

Dependiendo de la geometría de la sujeta superficie de deslizamiento se han ideado análisis de falla plana, circular y en cuñas o bloques, estas últimas tridimensionales. Existe mucha bibliografía al respecto, solo nos concretamos a dar un ejemplo de un análisis de estabilidad por cuñas que se asemeja a la técnica del "Lagenkugel" usado en la mina Cala y desarrollado en la Univesidad de Karlsruhe.

#### b. —Análisis Esfuerzo Deformación

La aplicación de este análisis en principio estuvo restringido a materiales de propiedades y comportamiento homogéneos, actualmente con el desarrollo de las técnicas de análisis numérico y computadoras digitales resulta ser el método más avanzado y versátil a ser usado en investigaciones de taludes, ya que puede modelar la estructura de un macizo rocoso (fracturas, fallas, etc.)

La técnica de ELEMENTOS FINITOS es un tipo de análisis esfuerzo/deformación mediante la cual se predice la naturaleza y extensión de desplazamiento compatibles con el equilibrio del talud a medida que se vaya minando, lo cual significa que la estática de estos taludes dependerá de la geometría del tajo y del estado de esfuerzos primarios. Los datos de entrada son:

- Estado de esfuerzos primarios
- Modulo de elasticidad
- Valores de fricción (cohesión, ángulo de fricción).
- Resistencia compresiva

—Disposición estructural y geometría presente del tajo.

El método de elementos finitos en sí, consiste en dividir las paredes del talud en mallas de elementos triangulares o rectangulares. Las esquinas o nodos de estos elementos son conectados en forma similar al desplazamiento que ocurrirá. Se asume que cada elemento es homogéneo.

Con ayuda de programas de cómputo, se calcula los desplazamientos en 2 direcciones, estos cálculos se basan en el equilibrio existente entre las cargas externas (peso propio del macizo rocoso, presión de agua, etc.) y las fuerzas inducidas por la deformación de cada elemento.

Se establece un criterio de falla para los desplazamientos. Si para una determinada sección exceden, un valor crítico, la roca de la zona tendrá una resistencia reducida, si se usan una serie de estos valores se puede llegar a determinar una forma simple de falla progresiva. La figura (8a) muestra un ejemplo típico de malla de elementos finitos y la figura (8b) muestra los resultados de los desplazamientos para un análisis de elementos finitos de un talud.

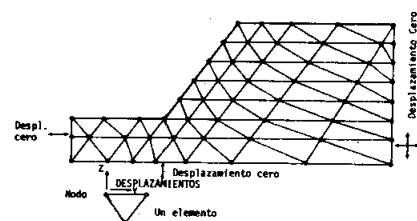


Fig. 8a. Típica malla de elementos finitos para un talud

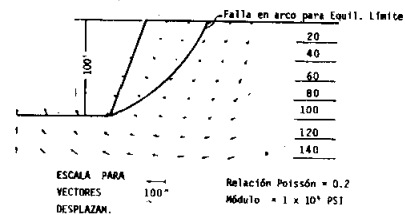


Fig. 8b. Desplazamientos resultantes para análisis de elementos finitos

Resumiendo los dos modelos matemáticos tenemos: el análisis de equilibrio límite asume una superficie de falla y una distribución de esfuerzos y luego localiza la superficie más probable para el movimiento, mientras que el análisis esfuerzo deformación asume un estado de esfuerzos primarios y luego calcula el lugar donde ocurrirán los desplazamientos y la falla potencial.

Finalmente, en nuestro medio, los programas de trabajo adecuados para el análisis de taludes por elementos finitos están implementándose en INCITEMI.

### ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE TÉCNICAS ESTEREOGRÁFICAS

El trabajo que aquí nos ocupa, está encaminado a proporcionar una visión panorámica de las facilidades de las técnicas estereográficas como herramientas para la resolución de los problemas de ingeniería dentro de las geociencias.

Estos procedimientos, que en la práctica se han revelado como los más adecuados serán expuestos lo más claramente posible mediante la resolución de algunos problemas de aplicación (referencias 3 y 7). Se tendrán en cuenta las siguientes premisas:

1.—Las deformaciones y roturas de las rocas, tendrá lugar únicamente a lo largo de las superficies de separación previamente supuesta

2.—La roca se supondrá de una competencia tal que tanto su rotura como su deformación queden excluidas.

### CASO N° 1

#### Deslizamiento sobre un plano por fricción simple:

$$\phi = 40^\circ$$

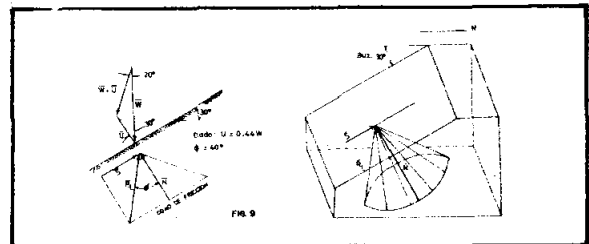
Si  $W$  es el peso de la cuña en un plano de junta buzando  $30^\circ$  y con un rumbo paralelo a la cara del talud.

$U$  es la presión de poro actuando sobre el plano.

$W + U$  será la fuerza total a ser resistida por la fuerza  $R_L$ .

La inclinación máxima de  $R_L$  con respecto de la normal  $N$  es  $\phi$ .

Si la cuña desliza hacia abajo a lo largo de la dirección del buzamiento, entonces la fuerza  $S$  actuará hacia arriba y está mostrada en la Fig. N° 9.

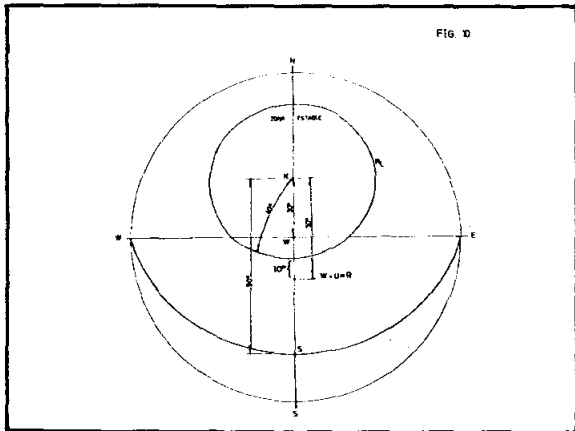


Cuando la fuerza impulsora, llega a ser igual a  $S=N$ .  $Tg \phi$  la falla es inminente, para esta condición  $R_L$  estará inclinada con un ángulo máximo de  $\phi$  con respecto a la normal.

La fuerza normal  $N$  sobre el plano podrá graficarse como el polo del plano en el diagrama estereográfico. Con centro en  $N$  y con un radio de  $\phi$  se graficará el cono de fricción (en un sentido puramente geométrico puede suponerse el cono como un cuerpo de revolución en torno a la normal de una superficie dada por su polo  $N$ ). Mediante esta sencilla construcción se delimitarán en la red estereográfica las zonas estables e inestables.

Nótese que  $N$  no está en el centro del círculo, excepto si coincidiera con el centro del plano ecuatorial.

En la representación estereográfica se puede observar que si la fuerza resultante  $R=W+U$  cae dentro del cono de fricción el movimiento no es cinemáticamente posible  $FS > 1$ . Si  $R$  cae en la circunferencia (Fig. N° 10) se tendrá una condición de equilibrio límite (falla incipiente), con un factor de seguridad  $FS=1$ . Si  $R$  cae fuera del cono de fricción el deslizamiento es cinemáticamente posible con un factor de seguridad  $FS < 1$ ; por otra parte, si la fuerza que actúa es sólo  $W$  la falla no ocurrirá desde que  $\phi = 40^\circ$  y la inclinación del plano de junta es  $30^\circ$ , esta conclusión lógica es también observada en la red estereográfica, pues  $W$  estará situada en el centro de la estereonet, y por lo tanto dentro del cono de fricción.



Consideramos ahora una fuerza debida a la presión de poro  $U$  actuando normal a los planos de junta. La fuerza resultante  $R=W+U$  es determinada gráficamente. El buzamiento de la resultante  $W+U$  es  $70^\circ$  y cae  $10^\circ$  fuera del cono de fricción representando una condición inestable.

Para este caso el factor de seguridad será:

$$\text{Considerando } W; FS = \frac{\text{tg } 40^\circ}{\text{tg } 30^\circ} = 1.45$$

$$\text{Considerando } W+U; FS = \frac{\text{tg } 40^\circ}{\text{tg } 50^\circ} = 0.73$$

\* La notación  $\alpha/\beta^\circ$  significa dirección del buzamiento y buzamiento respectivamente.

En el caso tratado líneas arriba se consideró la fuerza  $W$  y  $W+U$ , consideraremos ahora el caso en el que además de las fuerzas  $W$  y  $U$ , actúa una fuerza  $P$  de orientación cualquiera (por ejemplo una carga sísmica; (Fig. 11).

#### DATOS

**Direc.  
de Buz. Buz.**

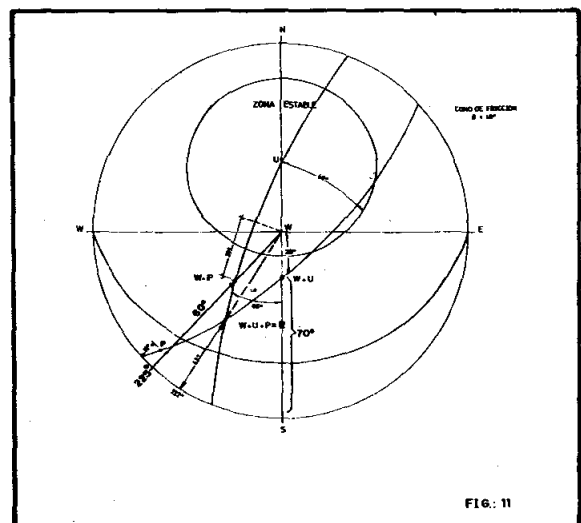
TALUD  $180^\circ/30^\circ$   
 FUERZA EXTERNA  $P=0.66W$   $225^\circ/10^\circ$   
 PESO — CUÑA  $W$   
 PRESION DE PORO  $U=0.44W$   
 ANGULO DE FRICCIÓN  $\phi=40^\circ$

Cálculo de la fuerza  $W+U$  (con la Fig. 12) la orientación de  $W+U$  será  $(180^\circ/70^\circ)^*$

La combinación de  $W$  y  $P$  usando el polígono de fuerzas de la Fig. 13, da el vector  $W+P$  a  $(225^\circ/60^\circ)$ .

En el diagrama estereográfico construimos 2 planos, uno que contiene las fuerzas  $W+P$  y  $U$ , y el otro que contiene las fuerzas  $W+U$  y  $P$ .

La intersección de estos dos planos representa la dirección de la resultante  $W+U+P$ , como se muestra en la figura N° 11. La orientación de la fuerza resultante es  $(212^\circ/42^\circ)$ .



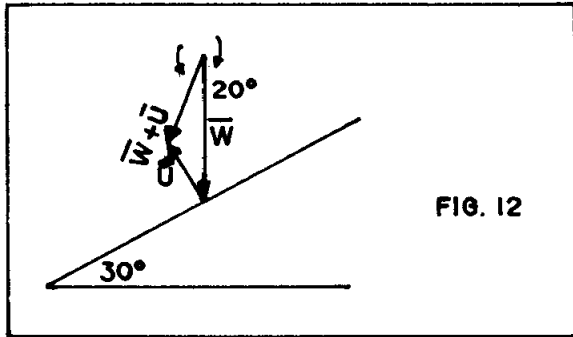


FIG. 12

**Dirección del movimiento y cálculo del factor de seguridad**

Se puede observar que la fuerza resultante R cae fuera del cono de fricción por consiguiente podrá ocurrir deslizamientos.

Trazamos sobre el diagrama estereográfico el plano que contenga la fuerza R y la

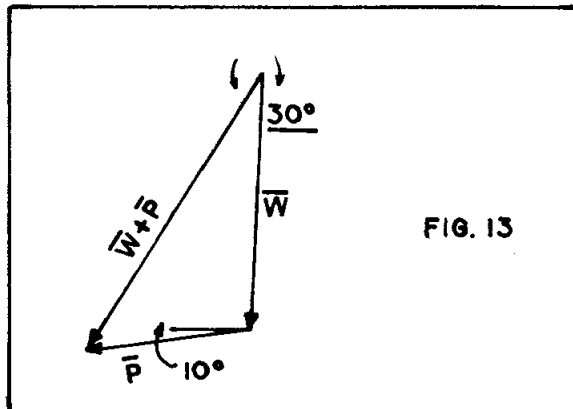


FIG. 13

normal. (Fig. 14). La fuerza S estará en este plano y sobre el plano de la junta.

De aquí se obtiene que el punto de intersección de los 2 planos representa la dirección de la fuerza S, entonces la dirección de deslizamiento coincidirá con la dirección S. (Fig. 15). Se podrá observar en la figura que el desplazamiento ocurrirá a  $(207^\circ/25^\circ)$  (esta dirección no es la misma que la de la resultante R de  $212^\circ$ ).

El factor de seguridad es obtenido de la distancia angular a lo largo del círculo máximo.

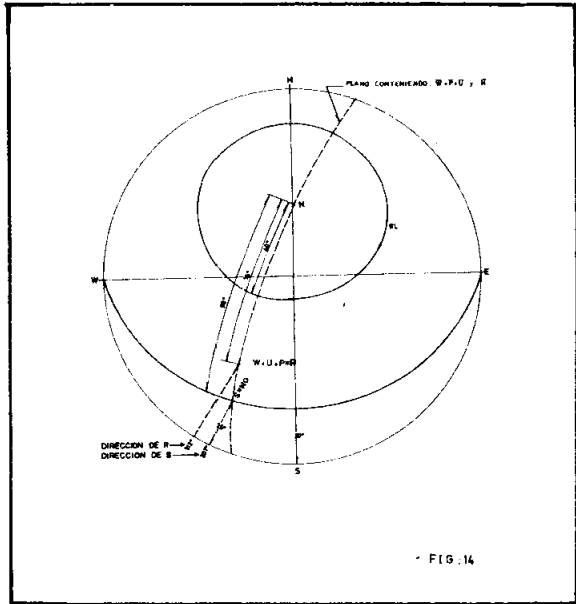


FIG. 14

de N a  $R_L$  el ángulo es  $40^\circ$   
de N a R el ángulo es  $75^\circ$

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{tg } 40^\circ}{\text{tg } 75^\circ} = 0.22$$

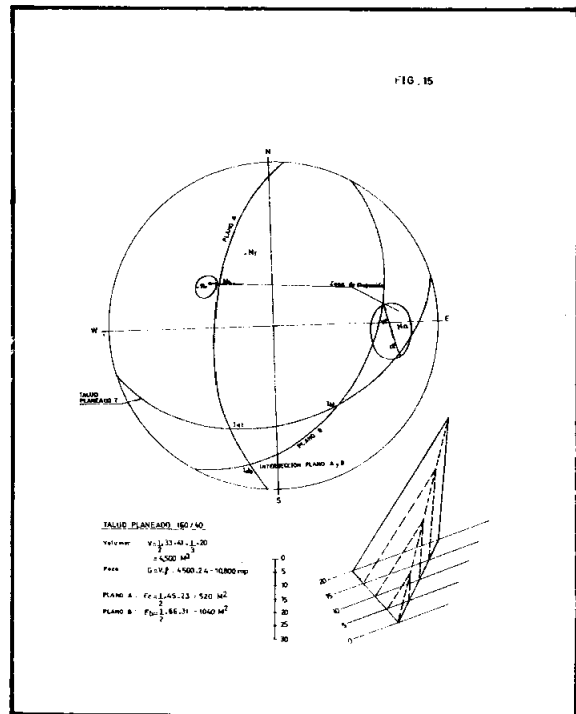


FIG. 15

## DISPERSION DE LOS DATOS

Cuando dos o más grupos de fracturas se cortan con unos datos de situación espacial dispersos en una cierta área, se obtendrá en el diagrama zonas tanto para  $N_I$ , (polos de planos) como para  $I$ , (Intersecciones) para dispersiones crecientes la zona de corte o intersección se hace más grande con mayor rapidez quedando mal definidas las cuñas de deslizamientos.

Estas manifestaciones serán realistas siempre y cuando se basen en datos sistematizados. Como una dispersión creciente debilita los resultados con relativa rapidez, deberá hacerse consideraciones de tipo probabilístico

Superficie	Dirección Buzamiento	Buzamiento	Dispersión $\delta$	Rozamiento $\rho$	Rozamiento Efectivo	Cohesión $mp/m^2$
A	274°	60°	12°	34°	22°	5
B	122°	40°	5°	12°	7°	1
TALUD	160°	40°				

teniendo en cuenta la dispersión de los datos geológicos iniciales, Goodman da una conveniente consideración del cono de fricción y la dispersión de los datos espaciales de un juego de fracturas, sin embargo, no existe una técnica universalmente aceptada.

En el cálculo del factor de seguridad deberá tenerse en cuenta esta dispersión, pues el despreciarlos dará lugar a graves errores en la valorización final.

Estas consideraciones alumbran los límites de la comprensión de la cinemática de los deslizamientos y precisamente por ello serán expuestos en este trabajo.

Se definirá el ángulo de rozamiento mínimo efectivo  $\rho'$  mediante la relación  $\rho' = \rho - \delta$  donde:

$\rho$  ángulo de rozamiento  
 $\delta$  ángulo de dispersión

En el caso de una distribución irregular de las superficies de separación la estimación

de la estabilidad es difícil de resolver errando riesgo considerable, para estos casos críticos deberán hacerse ajustes en el modelo, e hipótesis convenientes.

En un talud que se planea o para el control de un talud en terreno fracturado se tratará de resolver la posibilidad de movimiento bajo el efecto de las cargas activas y pasivas, en ocasiones determinar las fuerzas que habrá que comunicarse a los anclajes (elevar el factor de seguridad  $FS = a 1$ ) si se colocaran y la dirección de los mismos.

En el problema en cuestión se dispone de los siguientes datos graficados en la figura 15.

### Determinación de la resultante de las cargas exteriores

La figura 16 da la determinación de la resultante  $R$  a partir del peso propio  $G$  y los

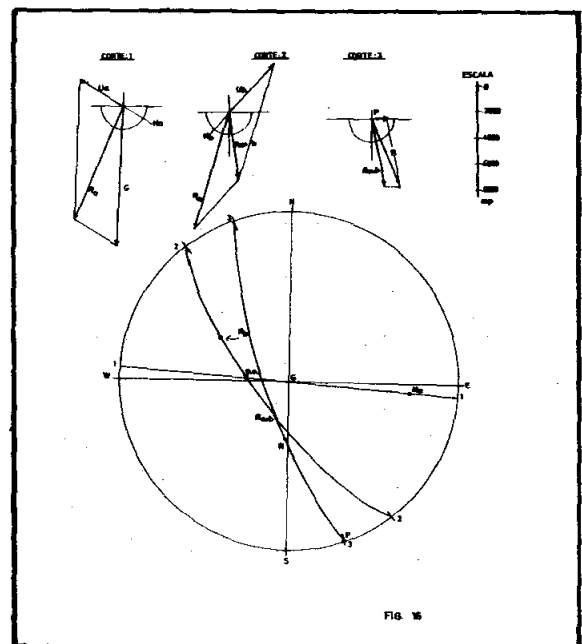


FIG. 16

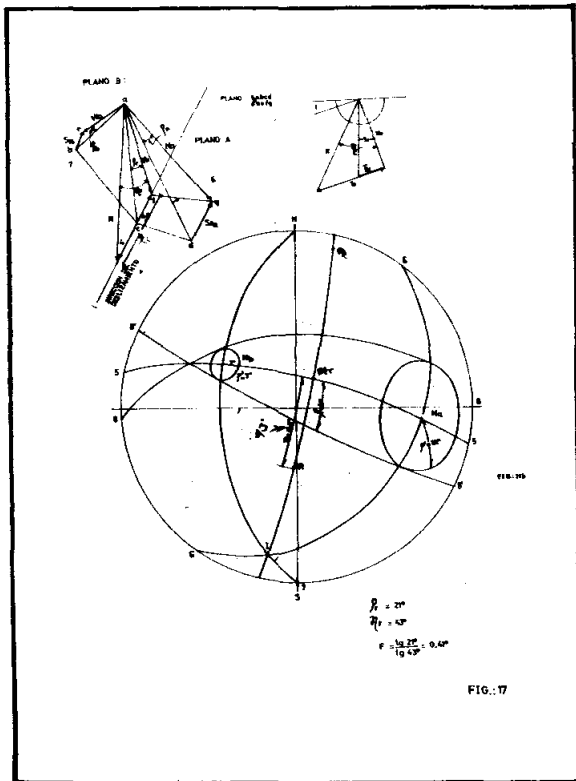
empujes de agua en las fracturas  $U_a$  y  $U_b$  y la carga dinámica  $P$  supuesta en dirección horizontal.

Corte 1 combinación de  $G$  y  $U_a$  ( $U_a$  es normal al plano A y esta dada por  $N_a$ ) da  $R_a$

Corte 2 combinación de  $R_a$  y  $U_b$  da  $R_{ab}$

Corte 3 combinación de  $R_{ab}$  con la fuerza horizontal  $P$  da resultante total  $R$

El equilibrio límite de la cuña de deslizamiento debido a la fricción de las fracturas esta mostrada en la figura 17, en ella se puede observar que la cuña cargada por la resultante  $R$  desliza en dirección de la intersección  $I$  de las superficies A y B las resistencias al corte  $S_{ra}$  y  $S_{rb}$  debidas al rozamiento entre ambas fracturas actúan en los planos 6 y 7 paralelas a la dirección del deslizamiento, las cuales pasan a través de  $N_a$  e  $I$  y de  $N_b$  e  $I$ .



Los planos del equilibrio límite son 8 y 8' todas las direcciones de carga que caen dentro de las zonas definidas por los conos de fricción con sus planos límites comunicándose, no dan lugar a deslizamientos.

En este caso  $R$  cae fuera de la zona estable, la cuña deslizará hacia abajo el factor de seguridad es:

$$F = \frac{S_r}{T_r} = \frac{R \cos \eta_r \cdot \text{tg } \rho_r}{R \sin \eta_r}$$

$$= \frac{\text{tg } \rho_r}{\text{tg } \eta_r} = \frac{\text{tg } 21}{\text{tg } 43} = 0.41$$

El equilibrio de la cuña teniendo en cuenta el rozamiento sobre las fracturas y la cohesión técnica será:

Corte 4 Descomposición de  $R$  en sus componentes tangencial  $T_r$  y Normal  $N_r$

Corte 5 Descomposición de  $N_r$  en  $N_a$  y  $N_b$  fuerzas Normales a la superficie A y B

Corte 6 Determinación de  $S_a$ , resistencia al corte a lo largo de la fractura A  
 $S_a = S_{ra} + S_{ca}$   
 $S_{ra}$  de fricción y  $S_{ca}$  de cohesión se obtiene el ángulo de fricción aparente de la fricción y cohesión  
 $\rho_{aa} = 49^\circ$

Corte 7 Como en 6 pero para la fractura B obteniendo  $S_b$  y  $\rho_{ab} = 26^\circ$

Con  $\rho_{aa}$  y  $\rho_{ab}$  se construirán los conos de fricción aparente alrededor de  $N_a$  y  $N_b$  (conos de equilibrio límite) de la forma descrita en la fase anterior. El factor de seguridad (tomando los ángulos en la sección 4 de la figura 18) será:

$$FS = \frac{\text{tg } 50^\circ}{\text{tg } 43^\circ} = 1.28$$



Por otro lado los resultados dependerán directamente de la observación y de la acumulación de datos; cuanto más intensos sean estos dos aspectos, las conclusiones a que se llegen serán mucho más válidas.

Este trabajo ha sido enfocado directamente a evaluar la estabilidad de taludes en minas a cielo abierto, esto no quiere decir que las técnicas citadas hayan sido diseñadas exclusivamente con este fin, sino que constituye un arma poderosa para evaluar otros problemas geomecánicos relacionados con nuestra minería especialmente en roca fracturada.

Finalmente, los estudios de Estabilidad de Taludes en el Perú ya se han iniciado, actualmente INCITEMI lleva a cabo el diseño óptimo de los taludes en la Mina Cerro Verde, aplicando las técnicas discutidas en éste trabajo.

## REFERENCIAS

- (1) LAOS V., A., CORDOVA R., D. (Mayo, 1975): "Especialización en Mecánica de Rocas". España. Informe de Actividades presentado a INCITEMI.
- (2) CORDOVA R., D., LAOS V., A. (Oct., 1975): "Instrumentación de Campo para estudios de Estabilidad de Taludes de la Mina Río Tinto. Informe.
- (3) MULLER, L.: Reportes no publicados del Proyecto de Estabilidad de Taludes en la Mina de Cala. IBERGESA. Consultor. (Universidad de Karlsruhe).
- (4) HOOK, E., BRAY, J. (1974): "Rock Slopes Engineering", Institution of Mining and Metallurgy. Londres.
- (5) BRAWNER, C. O., MILLIGAN, V. (1970): "Stability in Open Pit Mining" Ed. Vancouver, Canadá.
- (6) CORDOVA R., D., LAOS V., A. (Abril, 1976): "Ensayos de Laboratorio de Mecánica de Rocas". Informe.
- (7) JENNINGS, J. E. (1973): "Rock Slopes Stability" Johannesburgo.
- (8) PHILLIPS, F. C. (1974): "La Aplicación de la Proyección Estereográfica en Geología Estructural". Ed. Blume.