

La cohesión en el análisis estereográfico de estabilidad de Taludes

Por el Ingeniero Gianfranco Perri

INTRODUCCION

En las estructuras rocosas marcadamente anisotropas, caracterizadas por la presencia de discontinuidades estructurales bien definidas y distribuidas en forma de atribuir al problema de estabilidad del talud un carácter esencialmente tridimensional, es muy común el empleo de las técnicas de la proyección estereográfica para el análisis y los cálculos de estabilidad.

La proyección estereográfica resulta en efecto un instrumento muy eficaz y simple para el estudio de las relaciones angulares entre planos y rectas en el espacio; y las discontinuidades geológicas que cortan a las masas rocosas y a los taludes respectivos, pueden ser consideradas como planos en el espacio mientras que las intersecciones entre las discontinuidades o entre éstas y los taludes, son rectas en el espacio.

Entre las diferentes proyecciones estereográficas existentes, aquella de Wulf denominada "de igual ángulo" se ajusta muy bien para los fines del análisis de estabilidad de taludes en cuanto tiene como principal característica el hecho que en ella los ángulos entre planos y planos, planos y rectas, rectas y rectas, no están sujetos a ninguna deformación, o sea quedan iguales a los correspondientes reales.

En el diagrama o retículo de Wulf (Fig. 1); un plano puede ser representado por un círculo grande (determinado por la orientación del respectivo diámetro, su rumbo, y por la distancia diametral del círculo grande desde el borde del retículo, su inclinación) o por el correspondiente polo (diametralmente opuesto al círculo grande respectivo y a distancia

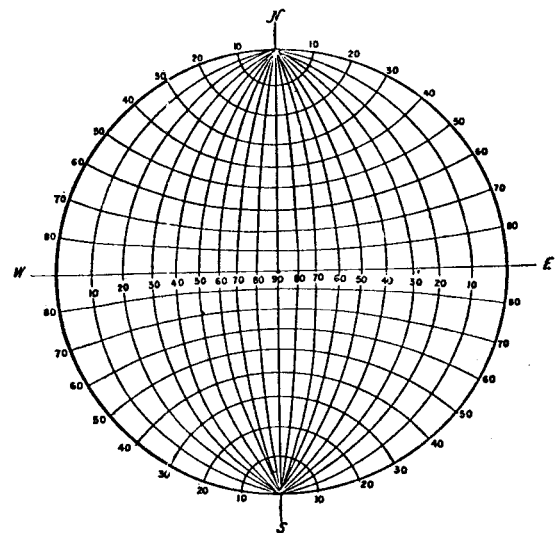


Figura 1.—Retículo estereográfico "de igual ángulo" de Wulf.

complementaria de él) y una recta está representada por su polo que define su rumbo e inclinación (ver Fig. 2).

El análisis de estabilidad para planos, cuñas o bloques en general, de rocas perteneciendo a un talud, pasa por tres etapas fundamentales que en el orden son:

- a) Verificación de la existencia de potencial inestabilidad con base en las características geométricas de la estructura en objeto. Para el caso de un simple plano de deslizamiento, el ángulo de inclinación, aparente o verdadero de la superficie potencial de deslizamiento, debe ser inferior al ángulo de inclinación del talud.

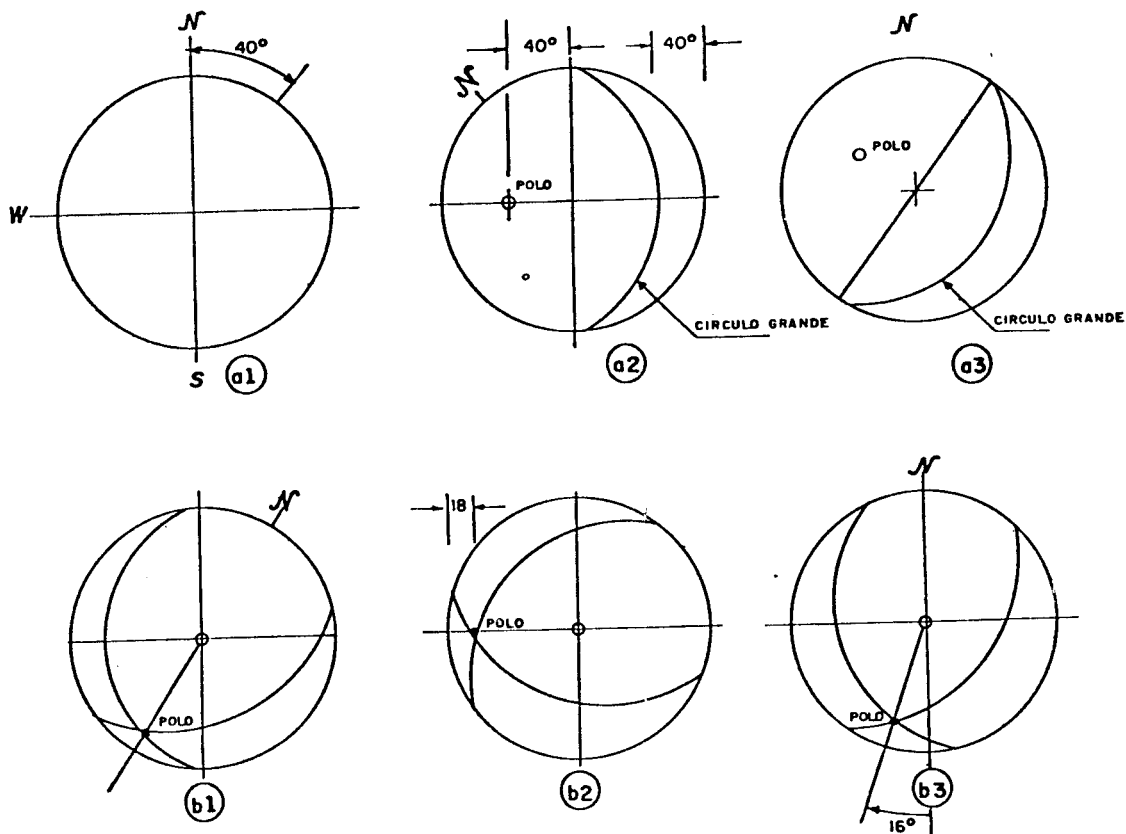


Figura 2.—(a) Ejemplificación de la construcción del círculo grande y del correspondiente polo relativos a un plano de rumbo N 40° E e inclinación 40° hacia S. (b) Ejemplificación de la construcción del polo de la recta intersección de dos planos que resulta poseer rumbo S 16° W e inclinación 18° hacia S.

En otras palabras, es necesario que la superficie de deslizamiento aflore en la cara libre del talud. Como otro ejemplo, de igual manera, para lo que se refiere a cuñas deslizantes a lo largo de la línea de intersección entre las dos discontinuidades constituyentes la cuña, la condición geométrica para que la inestabilidad ocurra, es que la misma línea aflore en la cara libre del talud, o sea que la inclinación de la intersección esté dirigida hacia el exterior del talud, según un ángulo inferior a la correspondiente pendiente del mismo en una dada orientación.

b) Para las situaciones de potencial inestabilidad geométrica según explicado en a), cuantificación de las resistencias al deslizamiento y cálculo del factor de se-

guridad. Este punto será tratado más extensamente en los párrafos siguientes.

c) Para las situaciones correspondientes a factores de seguridad menores o iguales a la unidad determinados según la etapa b), verificación y/o estimación de la existencia o no de los suficientes grados de libertad que permitan transformar la situación de potencial inestabilidad en "real inestabilidad".

LA RESISTENCIA AL CORTE EN LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA

Una característica y al mismo tiempo limitación de los métodos de proyección estereográfica en los análisis de estabilidad, está dada por considerarse para la resistencia, la contri-

bución de la sola fricción a lo largo de las superficies de potencial deslizamiento, despreciando, o sea, la contribución del segundo parámetro de resistencia al corte que es la cohesión.

En efecto, para una roca con discontinuidades representadas por diaclasas, juntas de estratificación fallas y fracturas en general, abiertas en una roca de buenas características de resistencia de fricción y que no estén rellenas por materiales de bajas calidades mecánicas, como generalmente ocurre en aquellos taludes rocosos en donde se aplica el método de la proyección estereográfica, siempre la contribución de la cohesión cuando no es realmente nula, resulta despreciable por respecto a aquella de la fricción.

De esta forma los cálculos de estabilidad mediante proyección estereográfica se simplifican mucho debido a que el problema queda en términos de relaciones, simplemente geométricas entre los elementos estructurales de la roca, el plano del talud y el ángulo o los ángulos de fricción existentes entre las superficies de potencial deslizamiento; en fin, no entran en juego el peso específico de la roca y la altura del talud o del bloque en potencial deslizamiento.

Por otro lado, no son raros en la práctica casos donde la naturaleza de la masa rocosa constituyente el talud es tal que actuando según las hipótesis de arriba, o sea, despreciando la cohesión, se cae en errores bastante grandes de subestimación de la resistencia al corte desarrollable y entonces en un demasiado conservador diseño de la estructura.

Se trata de aquellas rocas, como por ejemplo, algunos esquistos micáceos y/o filitas más o menos meteorizadas, que tanto comunes son en la región de Caracas y en las cuales los valores del ángulo de fricción desarrollable a lo largo de los planos de sedimentación o de foliación no son muy altos sino que están comprendidos entre 5 y 20.

Para estas rocas, los cálculos demuestran en muchos casos la considerable influencia de la cohesión en la determinación del valor del factor de seguridad y es para estos casos que debe renunciarse al interesante auxilio de los métodos clásicos que emplean proyección estereográfica en los cálculos de estabilidad. si no se toma en cuenta de alguna forma el efecto de la cohesión.

Ahora bien, el fin de este trabajo es justamente aquel de presentar un método suficientemente simple que permita tomar en cuenta la existencia de la cohesión en los análisis de estabilidad sin alterar en lo más mínimo la metodología normalmente usada para el cálculo del factor de seguridad en la proyección estereográfica.

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Conviene aquí comentar brevemente el método de cálculo del factor de seguridad normalmente usado en la proyección estereográfica en presencia de la sola fricción a lo largo de las discontinuidades. Se hace el ejemplo simple del potencial deslizamiento a lo largo de un solo plano en donde se ha verificado la existencia de las condiciones geométricas de potencialidad del deslizamiento. Por ejemplo: plano de talud con inclinación $i = 45^\circ$; discontinuidad con el mismo rumbo e inclinación $\beta = 25^\circ <$ (ver Fig. 3). El paso si-

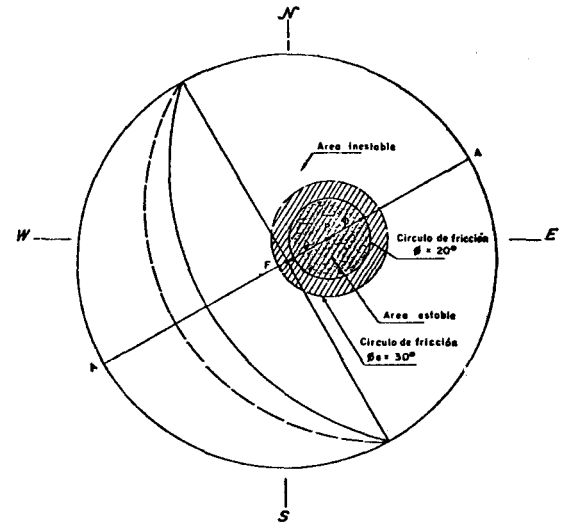


Figura 3.—(——) Plano del talud: rumbo N 30° W, inclinación 45° hacia W. - - - Plano de discontinuidad: rumbo N 30° W, inclinación 25° hacia W. P Polo del plano de discontinuidad. F Polo de la fuerza resultante deslizante.

guiente a la etapa "a" es trazar sobre el retículo, alrededor del polo "P" del plano de discontinuidad, el círculo de fricción relativo

al ángulo de fricción ($\phi = 20^\circ$) existente a lo largo de la superficie de discontinuidad; dicho círculo del cual P no es necesariamente el centro, es la proyección estereográfica sobre el retículo de Wulf del cono de fricción relativo al plano de la discontinuidad y al ángulo de fricción correspondiente. Ahora bien, el círculo de fricción delimita en el retículo de Wulf dos áreas, una interna a él denominada "área estable" y la otra externa a él denominada "área inestable"; cuando el polo de la fuerza resultante deslizante (generalmente el peso del volumen potencialmente deslizable) cae internamente al círculo de fricción hay estabilidad, cuando cae fuera hay inestabilidad; el factor de seguridad está dado por:

$$FS = \frac{\text{Tang } \phi}{\text{Tang } \alpha} = \frac{\text{Tang } 20}{\text{Tang } 25} = 0.78$$

siendo α la distancia angular entre el polo P y el polo de la resultante de las fuerzas deslizantes (F en el ejemplo de la figura 3) leído sobre el círculo grande pasante por P y F (en el ejemplo, el diámetro A-A).

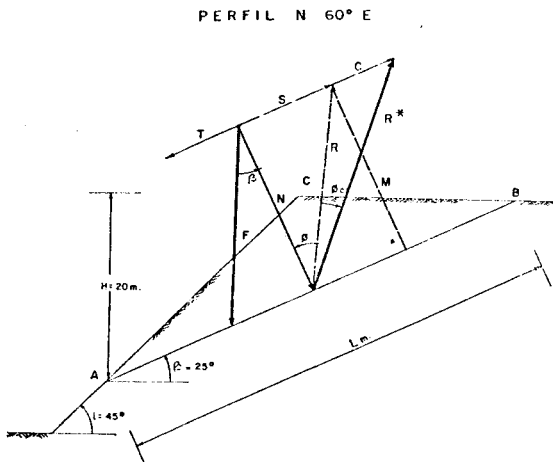


Figura 4.—Representación gráfica de las fuerzas y ángulos en juego para la determinación del factor de seguridad en el ejemplo considerado.

En el caso más general, el polo F no necesariamente coincide con el centro del retículo y asimismo la delimitación del retículo en un área estable y una inestable, no necesariamente está dada por un solo círculo de fricción sino por la combinación de más de ellos (por ejemplo dos en el caso de deslizamiento de cuñas sobre dos planos).

TOMANDO EN CUENTA EL EFECTO DE LA COHESION

En la Figura 4, se esquematiza el problema de estabilidad de un talud a lo largo de un plano de discontinuidad que podría ser el mismo del ejemplo anterior si la sección representada es la N 6° E.

La fuerza activa sobre el plano de discontinuidad AB es el peso F del volumen en potencial inestabilidad ABC, con dirección vertical y con sus dos componentes $N = F \cos \beta$, perpendicular a AB y $T = F \sin \beta$, paralela a AB; la fuerza resistente es R inclinada de ϕ respecto a la vertical de AB, siendo ϕ el ángulo de fricción entre las caras de la discontinuidad y con sus dos componentes $M = R \phi$ paralela igual y contraria a N y $S = R \sin \phi$ paralela y contraria a T.

Ahora bien la condición de equilibrio límite está dada por $S = T$ o $\phi = \beta$, ocurriendo la inestabilidad por $S < T$ o $\phi < \beta$. Sobre el retículo estereográfico el problema ya se había visualizado trazando el círculo de fricción alrededor del polo P de AB y el polo de la fuerza activa F que en este caso coincide con el centro del retículo; efectivamente, la condición de equilibrio límite ($\phi = \beta$) es aquella que ve el polo de F ubicado exactamente sobre el círculo de fricción, mientras que, como ya se comentó, la condición de inestabilidad ($\phi < \beta$) es aquella correspondiente al ejemplo que ve el polo F afuera del círculo de fricción.

Se considera ahora la existencia de cohesión a lo largo de AB (por ejemplo $c = 2 \text{ ton/m}^2$); la fuerza resistente de cohesión paralela a AB y con sentido igual a S vale $C = cxL$, L es el largo de AB. Resulta una fuerza resistente global de fricción y cohesión R^* que resulta inclinada de un ángulo que se llamará ϕ_c por respecto a la fuerza R (reacción debida a la sola fricción).

Ahora bien resulta fácil demostrar la existencia de la siguiente relación trigonométrica entre las variables involucradas:

$$\frac{4xc_x \cos \phi}{\gamma H_x \sin 2 \beta_x (\cotg \beta - \cotg i)} = \frac{\text{sen } \phi_c}{\cos (\phi + \phi_c)}$$

en donde la única variable aún no definida es γ que es el peso específico del material contenido en el volumen ABC en potencial des-

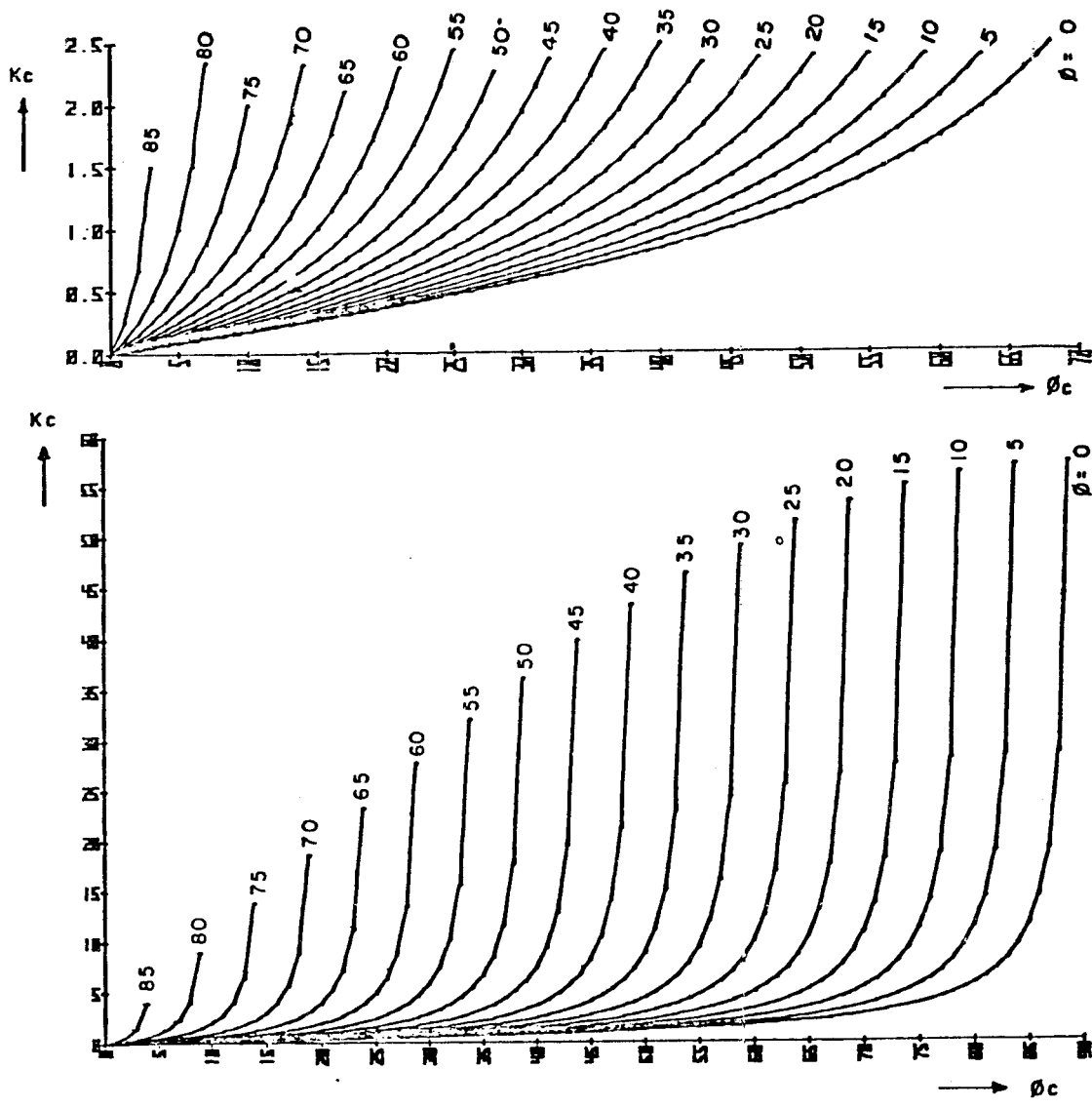


Figura 5.—Angulo de fricción (ϕ_c) equivalente al efecto de la cohesión (c) para diferentes valores del ángulo de fricción real (ϕ) y del paramento (k) característico de la geometría del talud y del peso específico del volumen deslizable.

lizamiento. Para agilizar la fórmula puede escribirse:

$$Kc = \frac{\text{sen } \phi_c}{\text{cos } (\phi + \phi_c)} \quad (I)$$

siendo K una característica del problema en estudio y que vale

$$K = \frac{4x \text{ cos } \phi}{\gamma Hx \text{ sen } 2 Bx (\text{cotg } \beta - \text{cotg } i)}$$

Finalmente, el último paso ha sido aquel de graficar la (I), resultando el diagrama representado en la figura 5.

En este diagrama se entra por un lado con el valor Kc , producto de la cohesión y del parámetro K , que a su vez es función de la geometría del problema en estudio, del ángulo de fricción ϕ y del peso específico; por el otro lado se escoge la curva en función del

ángulo de fricción ϕ y sobre el eje horizontal se obtiene directamente el valor de ϕ_c que puede bien definirse como "ángulo de fricción equivalente al efecto de la cohesión". Finalmente puede definirse un ángulo de fricción equivalente ($\phi_e = \phi + \phi_c$) del efecto combinado de cohesión y fricción real y de esta forma tratar el problema del análisis de estabilidad exactamente en los mismos términos del caso de existencia de sólo fricción con la simple sustitución del valor real de ϕ con el valor ϕ_e . Para completar el ejemplo anterior: (para $\gamma = 2 \text{ ton/m}^3$ y $H = 20 \text{ m}$):

$$K = 0,108 \quad \text{y} \quad K_c = 0,216$$

entonces en correspondencia de la curva $\phi = 20^\circ$; el diagrama da $\phi_c = 10^\circ$, o sea $\phi_e = 30^\circ$. Se traza el marco de un nuevo círculo de fricción correspondiente al valor de ϕ_e y se ve sobre el retículo que la situación del talud es ahora de estabilidad, siendo que el polo F, que no ha variado su posición, cae dentro del nuevo círculo de fricción.

Finalmente puede calcularse el nuevo valor del factor de seguridad

$$FS = \frac{\text{Tang } \phi_e}{\text{Tang } \alpha} = \frac{\text{Tang } 30}{\text{Tang } 25} = 1.24$$

En aquellos casos de geometría del talud no tan regular (por ejemplo ver Figura 6) el diagrama de Figura 5 puede aún usarse siendo en el caso general

$$K = \frac{L \cos \phi}{F \cos B}$$

en donde L es el largo del plano en que se

desarrolla la cohesión y F el peso del volumen potencialmente inestable.

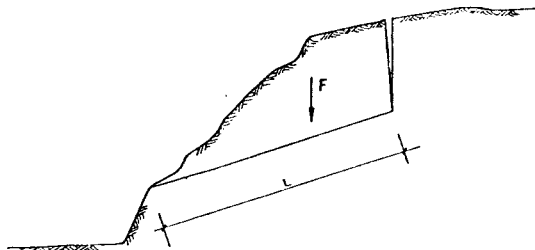


Figura 6.—Ejemplo de talud con geometría irregular.

En conclusión se hacen unas nuevas consideraciones acerca de lo que muestra el diagrama de la Figura 5:

- Para iguales condiciones geométricas e igual cohesión, el valor del "ángulo de fricción correspondiente al efecto de la cohesión", aumenta con la disminución del ángulo de fricción real; esto es decir que cuanto más bajo es el ángulo de fricción real tanto más importancia cuantitativa toma la contribución de la cohesión.
- El ángulo ϕ_c aumenta al aumentar el producto K_c y para valores de éste, mayores que 5, el valor de ϕ_c queda prácticamente igual a su valor máximo correspondiente a cada valor del ángulo ϕ .
- Desde un punto de vista práctico los valores numéricos de K_c están limitados a un rango de 0 a pocas unidades.