

Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura plana

Apellidos, nombre	Garzón Roca, Julio (jugarro@upv.es) Torrijo Echarri, F. Javier (fratorec@tr.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería del Terreno
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

La estabilidad de taludes en roca es un aspecto fundamental en el diseño de infraestructuras civiles tales como carreteras o ferrocarriles.

La rotura plana es uno de los tipos de inestabilidad de taludes en roca, en donde el mecanismo de fallo se produce debido al movimiento de una masa de terreno a favor del plano definido por una discontinuidad del macizo.

Sin embargo, no todas las discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden ocasionar roturas planas. Para ello es necesario que se cumplan una serie de condiciones cinemáticas relacionadas con la orientación de la discontinuidad respecto a la orientación del talud y la rugosidad del plano de deslizamiento. El estudio de la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de taludes se lleva a cabo mediante el empleo de la técnica conocida como proyección estereográfica.

2 Objetivos

Tras la lectura de este artículo se espera que el lector sea capaz de:

- Identificar la rotura plana como uno de los mecanismos de inestabilidad de un talud en roca.
- Identificar las condiciones cinemáticas que pueden provocar una rotura plana en un talud en roca.
- Analizar la existencia de roturas planas en taludes en roca, haciendo uso de la proyección estereográfica para representar los planos de discontinuidad del macizo rocoso y el talud objeto de estudio.

3 Introducción

La rotura plana es una de las tipologías básicas de inestabilidad de taludes en roca. Tal y como muestra la Figura 1, este tipo de inestabilidad tiene lugar cuando una masa rocosa desliza respecto al resto del macizo a través de una discontinuidad que aflora en el exterior del talud, existiendo en todo momento una superficie de contacto entre la masa deslizante y el macizo rocoso.

La estabilidad de taludes en roca es un aspecto fundamental en el diseño de infraestructuras civiles tales como carreteras o ferrocarriles. Así, por ejemplo, el trazado de una carretera es usual que no discurra totalmente en una planicie, sino que atraviese zonas más o menos montañosas, para lo que será necesario ejecutar desmontes que den como resultado una serie de taludes, de los cuales es necesario asegurar su estabilidad.

Fundamentalmente existen tres tipologías de inestabilidad de taludes en roca: rotura plana, rotura por cuñas (cuneiforme) y vuelco. En este artículo se analiza la primera de ellas, la rotura plana.

Excepto en las raras y escasas situaciones en que se dan masas rocosas completamente masivas, sin fracturación, la mayoría de los macizos rocosos son un ensamblaje de bloques de roca delineados, en tres dimensiones, por un sistema de discontinuidades. Estas discontinuidades pueden aparecer aisladas (como es el

caso habitual de las fallas) o de forma sistemática formando familias (como es el caso de los plano de estratificación, los planos de esquistosidad o el diaclasado) y definen la estructura del macizo rocoso.

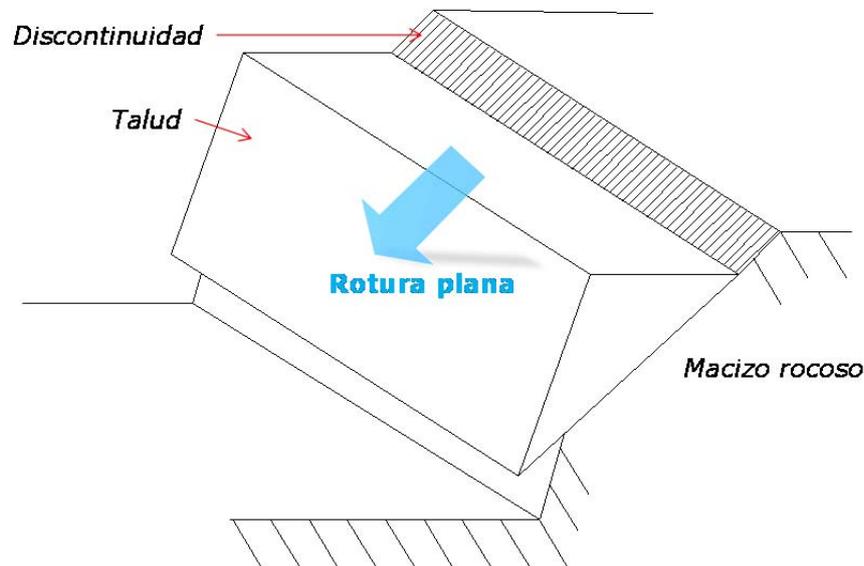


Figura 1. Rotura plana

El estudio de la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de taludes se lleva a cabo mediante el empleo de la técnica conocida como proyección estereográfica. Con esta herramienta es posible analizar la estructura del macizo rocoso en relación con los taludes a ejecutar, y determinar si la orientación de las discontinuidades y su rugosidad hacen que se cumplan los requisitos cinemáticos que puedan dar lugar a una inestabilidad del tipo rotura plana.

4 La proyección estereográfica y la representación de planos

En general las discontinuidades se asimilan a planos para su estudio. Desde la perspectiva de la estabilidad de taludes, la característica más importante de una discontinuidad es su orientación, la cual se define en base a dos parámetros medidos en la línea de máxima pendiente del plano: buzamiento y dirección de buzamiento.

El buzamiento es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente, en el plano vertical que la contiene, con el plano horizontal (es decir, la inclinación de la discontinuidad por debajo del plano horizontal). La dirección de buzamiento indica el ángulo respecto al norte de la línea de máxima pendiente (considerando el sentido de esta hacia el interior del terreno). Ambas medidas pueden obtenerse directamente en campo empelando una brújula de geólogo.

El análisis tridimensional de las discontinuidades de un macizo rocoso puede llegar a ser muy complejo. Por ello en geología se emplea la proyección estereográfica. Esta técnica de representación geométrica permite traducir un problema tridimensional a dos dimensiones, de forma que los planos se pueden representar

mediante líneas y las líneas mediante puntos. La proyección estereográfica conserva las relaciones angulares entre líneas, planos y líneas y planos, pero no conserva las relaciones espaciales (por lo que no da información sobre la posición o el tamaño de lo que se representa). Mediante el uso de la proyección estereográfica es posible resolver gran cantidad de problemas geométricos con facilidad y rapidez, siempre que en ellos solo intervengan valores angulares.

La proyección estereográfica se basa en el uso de una esfera imaginaria de referencia que tiene una orientación fija de su eje con respecto al norte y de su plano ecuatorial con respecto a la horizontal. Los planos y líneas se representan a través de la proyección en el plano ecuatorial (plano de proyección) de la intersección del elemento a representar con el hemisferio inferior de la esfera imaginaria.

Así, cualquier plano que se quiera representar mediante esta técnica (Figura 2) se posiciona de forma que éste atraviese el centro de la esfera, produciendo una línea de intersección (traza del plano) con el hemisferio inferior de la esfera de referencia. La proyección de dicha traza en el plano ecuatorial es el resultado buscado, el cual será un círculo mayor. Los planos con buzamientos bajos tienen grandes círculos localizados cerca de la circunferencia primitiva (circunferencia correspondiente al propio plano ecuatorial) mientras que los planos con buzamientos altos se localizan hacia el centro del estereograma y sus trazas son cada vez más rectas.

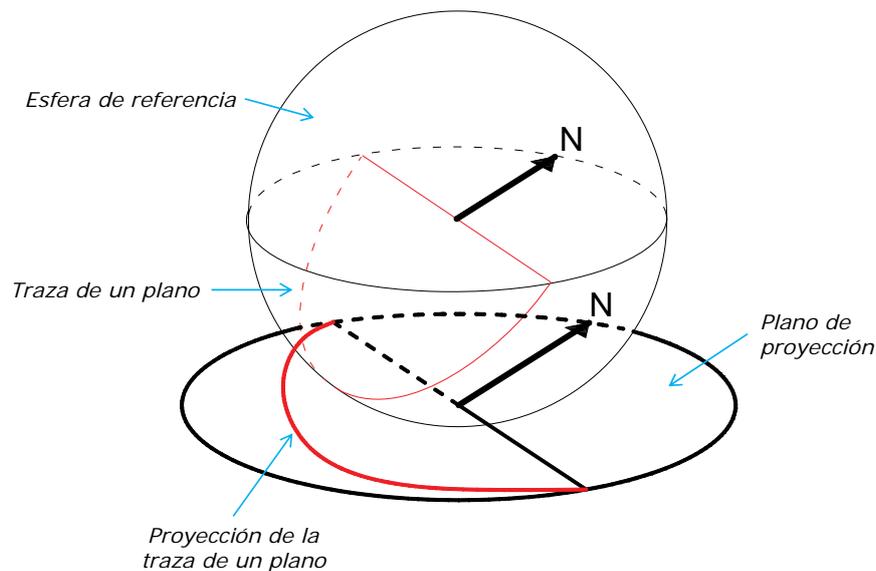


Figura 2. Representación de un plano en proyección estereográfica

Mediante el empleo de la proyección estereográfica es posible representar en un único elemento gráfico (estereograma) tanto las discontinuidades de un macizo rocoso como los taludes a estudiar, facilitando con ello la realización del análisis cinemático. Para más información sobre la proyección estereográfica, así como sobre el procedimiento gráfico para dibujar planos y líneas en este sistema de representación, puede consultarse el trabajo de Babin Vich y Gómez Ortiz (2010).

5 Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura plana

5.1 Generalidades

Las roturas planas son un tipo de mecanismo de fallo de taludes en roca en la que se produce el movimiento de una masa de terreno a favor del plano definido por una discontinuidad del macizo.

Sin embargo, no todas las discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden llevar a la que se produzca una rotura plana. Para discernir si las discontinuidades del macizo son susceptibles de producir este tipo de inestabilidad, y qué discontinuidades son potencialmente problemáticas, se debe realizar un análisis cinemático (Piteau and Peckover, 1978) con el apoyo de la representación de discontinuidades y taludes en proyección estereográfica.

5.2 Requisitos para que tenga lugar una rotura plana

Geoméricamente, la ocurrencia de rotura plana en un macizo depende de la orientación de las discontinuidades respecto a la orientación del talud, así como del buzamiento de las discontinuidades respecto al del talud. Además, mecánicamente, el deslizamiento sólo podrá tener lugar si se supera la fuerza de rozamiento en el plano de deslizamiento.

Es importante señalar que el análisis cinemático debe realizarse de forma independiente para cada discontinuidad (o familia o agrupación de discontinuidades) y para cada talud bajo estudio, ya que es más que probable que en un macizo rocoso sólo algunas de las discontinuidades existentes conlleven un riesgo potencial de rotura plana.

Así, para que una rotura plana pueda ocurrir tienen que darse los siguientes tres condiciones estructurales, que se recogen gráficamente en la Figura 3:

- La dirección de buzamiento de la discontinuidad (asimilada a un plano) debe ser "sensiblemente" paralela a la dirección de buzamiento del talud. Por lo general, se considera que la diferencia entre la dirección de buzamiento de la discontinuidad y la dirección de buzamiento del talud debe encontrarse un rango de más / menos 20°.
- El buzamiento de la discontinuidad (β_{disc}) debe ser menor que el buzamiento del talud (β_{talud}), de forma que la discontinuidad debe aflorar en la superficie del talud.
- El buzamiento de la discontinuidad (β_{disc}) debe ser mayor que el ángulo de rozamiento (ϕ) del plano de deslizamiento (normalmente se toma el ángulo de rozamiento o fricción de la discontinuidad).

Adicionalmente, para que se produzca rotura plana es necesario que existan lo que se denominan "juntas de relevo", tales como diaclasas laterales o grietas de tracción, que permitan que parte del masa rocosa que conforma el macizo pueda deslizarse y "separarse" de él.

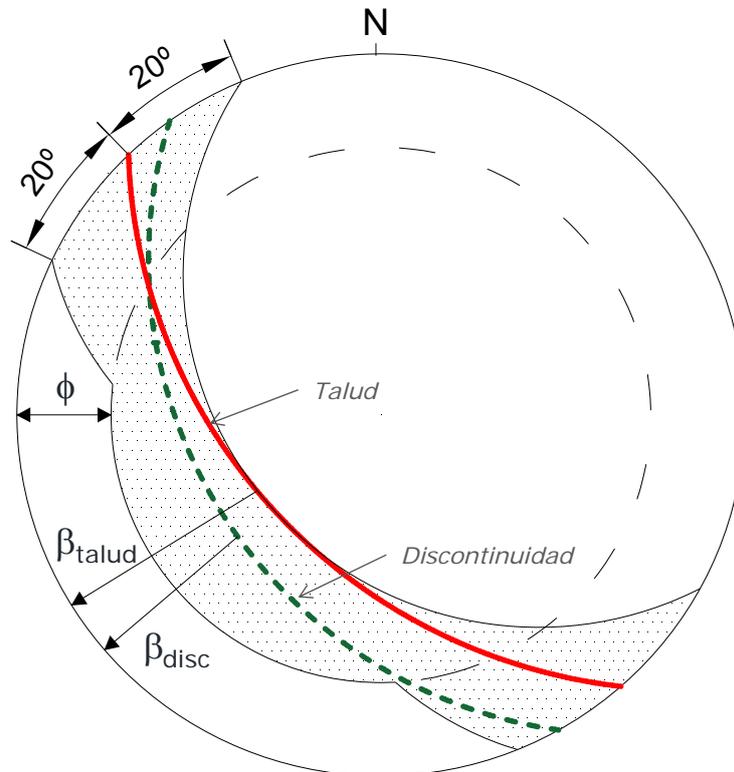


Figura 3. Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura plana. Cualquier discontinuidad que caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de rotura plana (cumple los condicionantes estructurales)

5.3 Ejemplos y ejercicios

Para poner en práctica los conceptos vistos en el epígrafe anterior se exponen a continuación un par de ejemplos que ilustran la metodología a seguir para el análisis de inestabilidad de taludes roca por rotura plana.

El primer ejemplo se recoge en la Figura 4a y muestra un macizo rocoso definido por tres familias de diaclasas (en verde) de orientaciones (buzamiento/ dirección de buzamiento): $25^\circ/180^\circ$, $60^\circ/235^\circ$ y $20^\circ/030^\circ$. El ángulo de rozamiento de las discontinuidades se considera de 20° . Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $80^\circ/240^\circ$ (en rojo).

Como puede verse, el diaclasado según $25^\circ/180^\circ$ y $20^\circ/030^\circ$ no puede ocasionar rotura plana ya que la dirección del plano que define al talud y el de dichas discontinuidades no es sensiblemente paralelo (la diferencia en el la dirección de buzamiento entre discontinuidades y el talud es mayor de 20°). Por el contrario, las discontinuidades definidas por $60^\circ/235^\circ$ representa un riesgo potencial de rotura plana, pues claramente se ve que se cumplen:

- La dirección de buzamiento de las discontinuidades (235°) está dentro del rango de más / menos 20° respecto a la de la dirección de buzamiento del talud (240°).
- El buzamiento de las discontinuidades (60°) es menor que el buzamiento del talud (80°).

- El buzamiento de las discontinuidades (60°) es mayor que el ángulo de rozamiento del plano de deslizamiento (20°).
- Además dicha discontinuidades son intersectadas por otras discontinuidades, por tanto existen juntas de relevo que permite el deslizamiento de la masa rocosa.

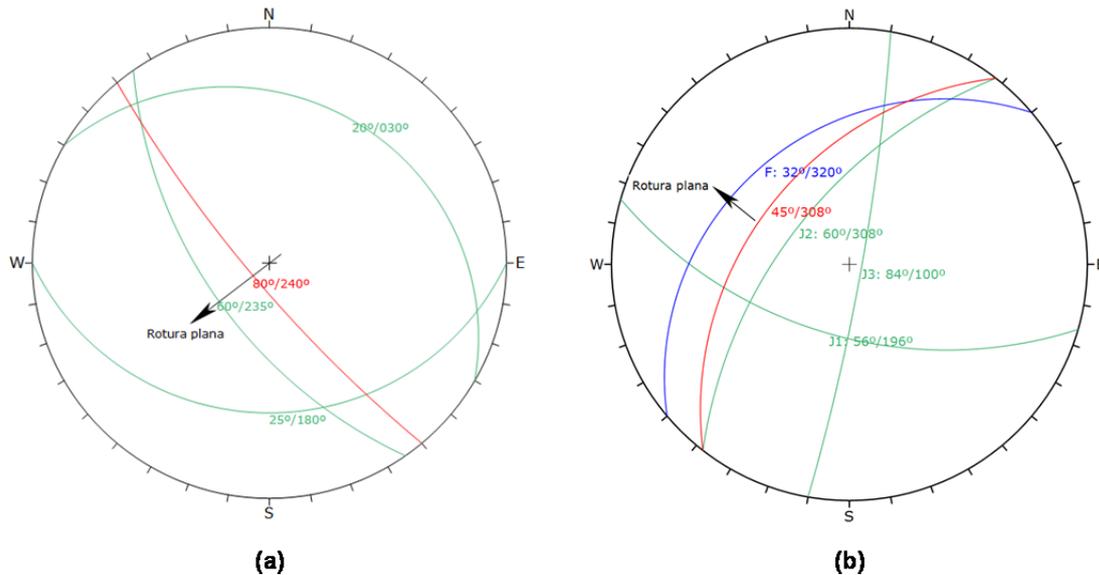


Figura 4. Ejemplos del análisis cinemático de estabilidad de taludes en roca por roturas planas

El segundo ejemplo se recoge en la Figura 4b y muestra un macizo rocoso definido por tres familias de diaclasas (J) de orientaciones: $56^\circ/196^\circ$, $60^\circ/308^\circ$ y $84^\circ/100^\circ$ (en verde). Asimismo, existe una falla (F) de orientación $32^\circ/320^\circ$ (en azul). El ángulo de rozamiento de las discontinuidades se considera de 25° para las diaclasas y 15° para la falla. Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $45^\circ/308^\circ$ (en rojo).

Como puede verse el diaclasado del macizo no puede dar lugar a que tenga lugar una rotura plana, pues en ningún caso se cumple todas las condiciones cinemáticas (las discontinuidades definida por la orientación $60^\circ/308^\circ$ si bien son paralelas tienen un buzamiento mayor al talud, por lo que no aflorarían en éste). La falla, sin embargo, sí que es susceptible de producir una rotura plana en el talud estudiado (rojo). Se deja al lector como ejercicio comprobar que efectivamente, para esta discontinuidad se cumplen todas las condiciones cinemáticas vistas anteriormente.

Finalmente, se proponen los siguientes ejercicios para practicar el análisis de inestabilidad de taludes roca por rotura plana:

- Talud definido según una orientación $22^\circ/175^\circ$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el primer ejemplo.
- Talud definido según una orientación $70^\circ/200^\circ$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el segundo ejemplo.

6 Conclusiones

Este documento ha mostrado de forma práctica la metodología a seguir para realizar el análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca a rotura plana.

Como se ha visto, para que exista la posibilidad de rotura plana es necesario que se cumplan tres condiciones: que la dirección de la discontinuidad y el talud sean "sensiblemente" paralelas; que la discontinuidad aflore en el talud; y que el buzamiento de la discontinuidad sea mayor que el rozamiento del plano de deslizamiento. Adicionalmente es necesario que existan juntas de relevo que permitan que la masa potencialmente deslizante pueda independizarse del resto del macizo.

Finalmente es importante señalar que si se detecta que la inestabilidad es cinemáticamente posible (es decir, se cumplen los condicionantes del párrafo anterior) será necesario realizar un análisis mecánico de estabilidad para determinar el factor de seguridad del talud, y de ser necesario diseñar medidas correctoras que garanticen la estabilidad. Dicho análisis se puede llevar a cabo por los procedimientos habituales empleados en la ingeniería geotécnica, en especial el empleo de métodos de equilibrio límite o el uso de modelos de elementos finitos.

Para ampliar información sobre la estabilidad de taludes en roca puede consultarse los trabajos de Turner y Schuster (1996), Giani (1992) y Hoek y Bray (1981).

7 Bibliografía

Babín Vich, R.; Gómez Ortiz, D.: "Problemas de Geología Estructural", en Reduca (Geología), Serie Geología Estructural, 2(1), 2010, pág.1-56.

Giani, G.P.: "Rock slope stability analysis", A. A. Balkema, 1992.

Hoek, E.; Bray, J.W.: "Rock slope engineering", 3rd ed., Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981.

Piteau, D.R.; Peckover, F.L.: "Engineering of rock slopes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control", en R.L.Schuster y R.J. Krizek, eds., TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1978, pág. 192-234.

Turner A. K.; Schuster, R.L.: "Landslides: Investigation and mitigation", en Special Report 247, Transport Research Board, National Research Council, 1996.