



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

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 cuneiforme es uno de los tipos de inestabilidad de taludes en roca, en donde el mecanismo de fallo se produce cuando una masa rocosa desliza a lo largo de dos discontinuidades que se intersectan y afloran en el talud de forma que se crea un bloque deslizante en forma de cuña.

Sin embargo, no todas las intersecciones de discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden ocasionar roturas cuneiformes. Para ello es necesario que se cumplan una serie de condiciones cinemáticas relacionadas con la orientación de las líneas de intersección de las discontinuidades respecto a la orientación del talud y con la rugosidad de los planos de deslizamiento. El estudio de la orientación de las líneas de intersección 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 cuneiforme como uno de los mecanismos de inestabilidad de un talud en roca.
- Identificar las condiciones cinemáticas que pueden provocar una rotura cuneiforme en un talud en roca.
- Analizar la existencia de roturas cuneiformes en taludes en roca, haciendo uso de la proyección estereográfica para representar los planos de discontinuidad del macizo rocoso, las intersecciones de dichas discontinuidades y el talud objeto de estudio.

3 Introducción

La rotura cuneiforme 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 dos planos de discontinuidad, de forma que la recta intersección resultante buza hacia el exterior del talud, existiendo en todo momento una arista 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 un ferrocarril es usual que no discorra 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 segunda de ellas, la rotura cuneiforme.

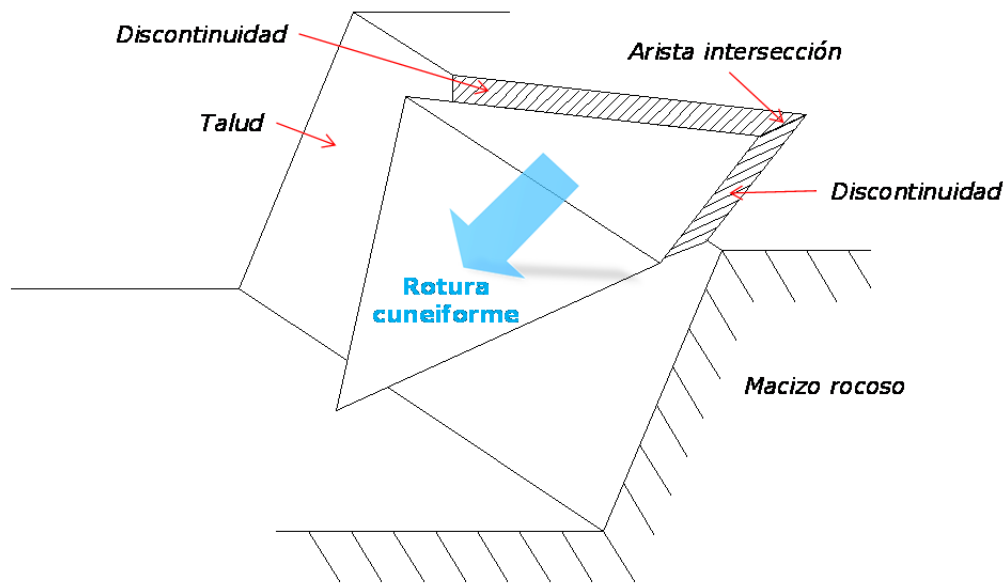


Figura 1. Rotura cuneiforme

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.

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 líneas de intersección de las discontinuidades y la rugosidad de los planos potenciales de deslizamiento hacen que se cumplan los requisitos cinemáticos que puedan dar lugar a una inestabilidad del tipo rotura cuneiforme.

4 La proyección estereográfica y la representación de planos y líneas

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.

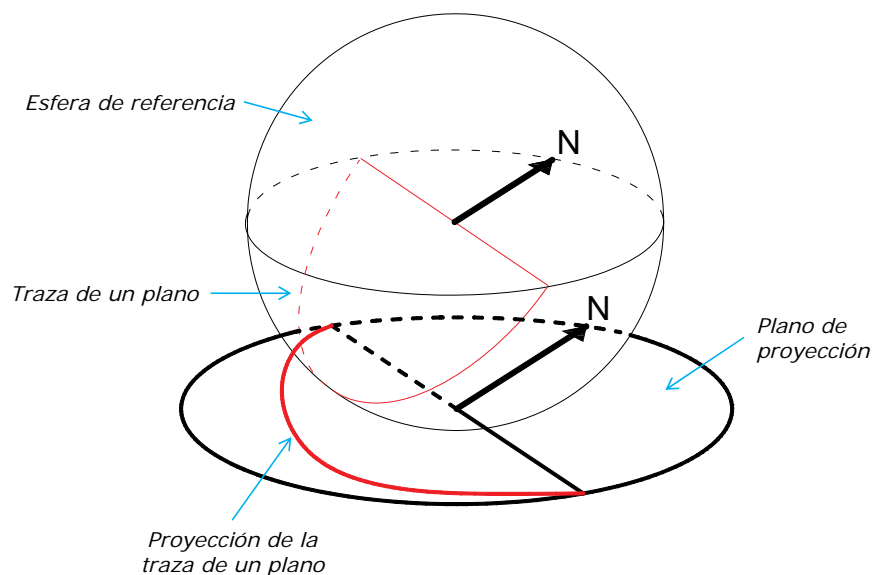


Figura 2. Representación de un plano en proyección estereográfica

Por su parte, cualquier línea que se quiera representar mediante proyección estereográfica se posiciona de forma que ésta atraviese el centro de la esfera imaginaria, produciendo un punto intersección con el hemisferio inferior de la esfera de referencia. La proyección de dicho punto en el plano ecuatorial es el resultado buscado. Es importante señalar que la intersección de dos planos genera una línea cuya correspondencia en proyección estereográfica es unívoca (es

decir, dados dos planos representados en proyección estereográfica, su recta intersección es precisamente el punto de corte de la traza de ambos planos).

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 cuneiforme

5.1 Generalidades

Las roturas cuneiformes son un tipo de mecanismo de fallo de taludes en roca que se producen cuando una masa rocosa desliza a lo largo de dos discontinuidades que se intersectan y afloran en el talud de forma que se crea un bloque deslizante en forma de cuña. Al realizarse la excavación del talud la línea de intersección que forma el eje de deslizamiento aflora en superficie y se produce el movimiento de la masa rocosa a lo largo de ambos planos simultáneamente o a lo largo del plano de mayor inclinación.

Sin embargo, no todas las intersecciones de discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden llevar a la que se produzca una rotura cuneiforme. 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 cuneiforme

Geoméricamente, la ocurrencia de rotura cuneiforme en un macizo depende de la inmersión (buzamiento) de las líneas de intersección de las discontinuidades respecto al buzamiento del talud. Además, mecánicamente, el deslizamiento sólo podrá tener lugar si se supera la fuerza de rozamiento en los planos de deslizamiento.

Es importante señalar que el análisis cinemático debe realizarse de forma independiente para cada línea de intersección detectada (que puede ser el resultado del cruce de diferentes familias o agrupación de discontinuidades) y para cada talud bajo estudio, ya que es probable que en un macizo rocoso sólo algunas de las intersecciones existentes conlleven un riesgo potencial de rotura cuneiforme.

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

- La línea intersección debe aflorar en la superficie del talud, por lo que su rumbo (dirección) debe ser "similar" a la dirección de buzamiento del talud (más bien, no debe localizarse de forma opuesta a la dirección de buzamiento del éste) y su inmersión (β_{arista}) debe ser menor que el buzamiento del talud (β_{talud}).

- La inmersión de la línea intersección (β_{arista}) debe ser mayor que el ángulo de rozamiento (ϕ) de los planos de deslizamiento (normalmente se toma el ángulo de rozamiento o fricción de las dos discontinuidades; si estos valores son muy diferentes, se puede hacer la media).

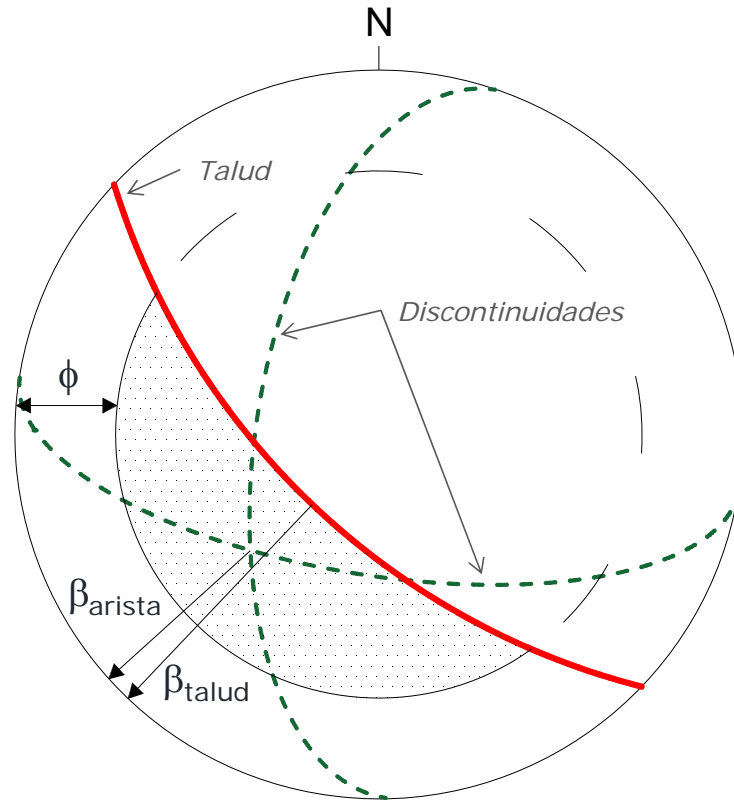


Figura 3. Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura cuneiforme. Cualquier intersección que caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de rotura cuneiforme (cumple los condicionantes estructurales)

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 cuneiforme.

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° (se ha dibujado en verde oscuro el cono de rozamiento correspondiente). Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $80^\circ/240^\circ$ (en rojo).

Como puede verse, el diaclasado del macizo produce tres intersecciones: $24^\circ/160^\circ$, $07^\circ/321^\circ$ y $06^\circ/103^\circ$. Las dos últimas presentan un rumbo opuesto al talud (están "al otro lado") por lo que no puede ocasionar roturas cuneiformes ya que dichas intersecciones nunca aflorarán en el talud. Por el contrario, la intersección $24^\circ/160^\circ$ sí representa un riesgo potencial de rotura cuneiforme, pues claramente se ve que se cumplen:

- La intersección aflora en el talud, pues “está en el mismo lado” que el talud y su inmersión (24°) es menor que el buzamiento del talud (80°).
- La inmersión de la línea intersección (24°) es mayor que el ángulo de rozamiento de los planos de deslizamiento (20°).

El segundo ejemplo se recoge en la Figura 4b y muestra un macizo rocoso definido por tres familias de diaclasas (J) de orientaciones (buzamiento/ dirección de buzamiento): $56^\circ/196^\circ$, $60^\circ/308^\circ$ 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 todas las discontinuidades se considera de 15° (se ha dibujado en verde oscuro el cono de rozamiento correspondiente). Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $45^\circ/308^\circ$ (en rojo).

Como puede verse, en este caso se tienen 6 intersecciones (aparecen recuadradas con los valores de inmersión y rumbo de cada línea intersección). De entre ellas sólo dos representan un riesgo potencial de rotura cuneiforme, $20^\circ/012^\circ$ y $22^\circ/270^\circ$. Se deja al lector como ejercicio comprobar que efectivamente, para ambos casos se cumplen las condiciones cinemáticas vistas anteriormente.

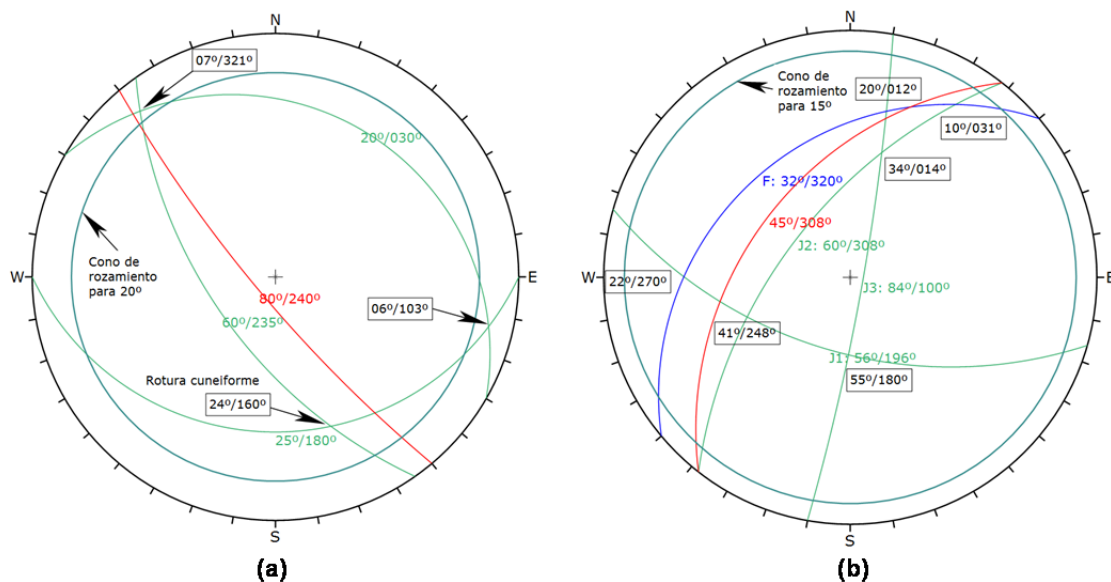


Figura 4. Ejemplos del análisis cinemático de estabilidad de taludes en roca por roturas cuneiformes

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

- Talud definido según una orientación $30^\circ/125^\circ$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el primer ejemplo.
- Talud definido según una orientación $20^\circ/200^\circ$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el segundo ejemplo.
- Talud definido según una orientación $60^\circ/080^\circ$ 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 cuneiforme.

Como se ha visto, para que exista la posibilidad de rotura cuneiforme es necesario que se cumplan las siguientes condiciones: que existan discontinuidades que se intersecten en el macizo rocoso; que la línea intersección de resultante aflore en el talud; y que la inmersión de la línea intersección sea mayor que el rozamiento de los planos de deslizamiento.

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

Babin 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.