

Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por vuelco (toppling)

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.

El vuelco (*toppling* en inglés) es uno de los tipos de inestabilidad de taludes en roca existentes, en donde el mecanismo de fallo se produce en macizos que están subdivididos por las fracturación del macizo en una serie de bloques o columnas aproximadamente verticales, de forma que es posible el giran alrededor de un punto fijo y el deslizamiento entre los propios bloques de roca.

Sin embargo, no todas las discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden ocasionar vuelcos. Para ello es necesario que se cumplan una serie de condiciones cinemáticas relacionadas con la orientación de las discontinuidades 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 el vuelco (*toppling*) como uno de los mecanismos de inestabilidad de un talud en roca.
- Identificar las condiciones cinemáticas que pueden provocar un mecanismo de vuelco (*toppling*) en un talud en roca.
- Analizar la existencia de vuelcos (*toppling*) 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

El vuelco (conocido en inglés como *toppling*) 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 las discontinuidades existentes en el macizo rocoso dan lugar a una serie de bloques o elementos columnares con un buzamiento muy pronunciado y contrario al buzamiento del talud, de forma que la rotura se produce, generalmente, por una rotación de dichas estructuras hacia el exterior del talud.

La estabilidad de taludes en roca es un aspecto fundamental en el diseño de infraestructuras civiles tales como carreteras o ferrocarriles. Así, el trazado de estas infraestructuras 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 tercera de ellas, el vuelco.

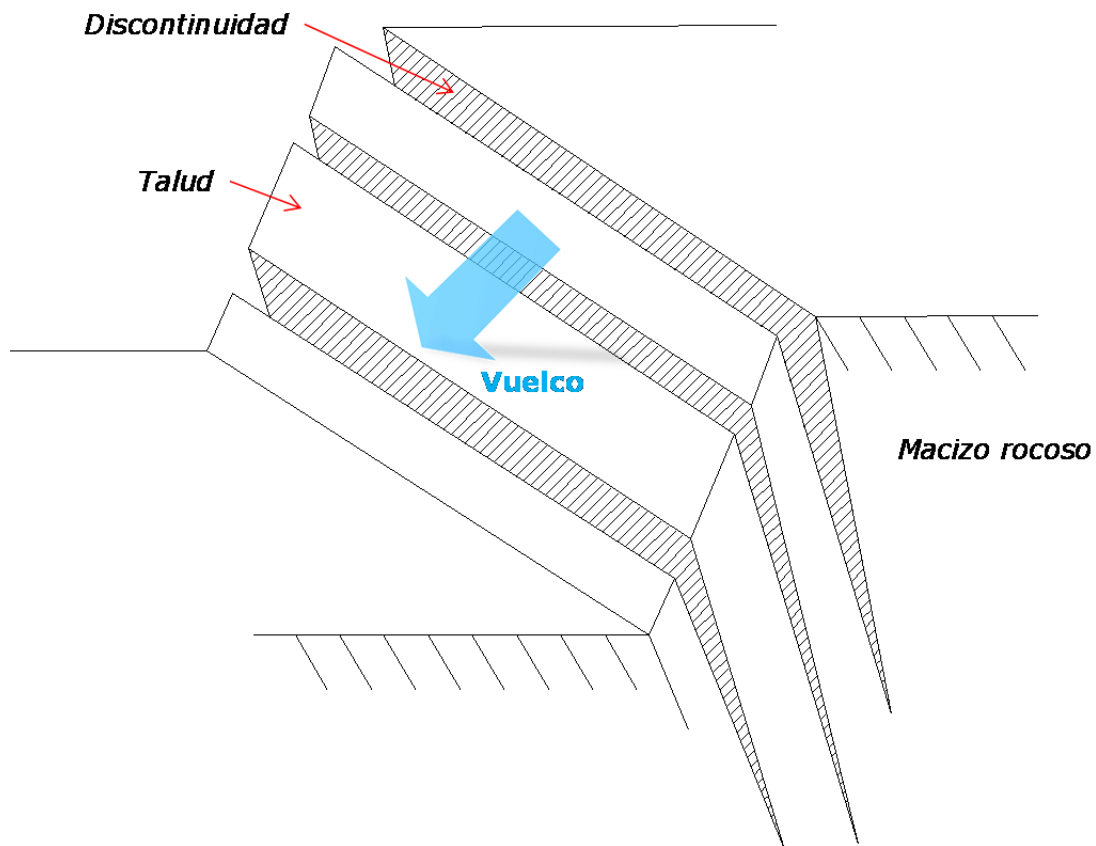


Figura 1. Vuelco (toppling)

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 discontinuidades y su rugosidad hacen que se cumplan los requisitos cinemáticos que puedan dar lugar a una inestabilidad del tipo vuelco.

4 La proyección estereográfica y la representación de planos y sus polos

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 atraviase 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.

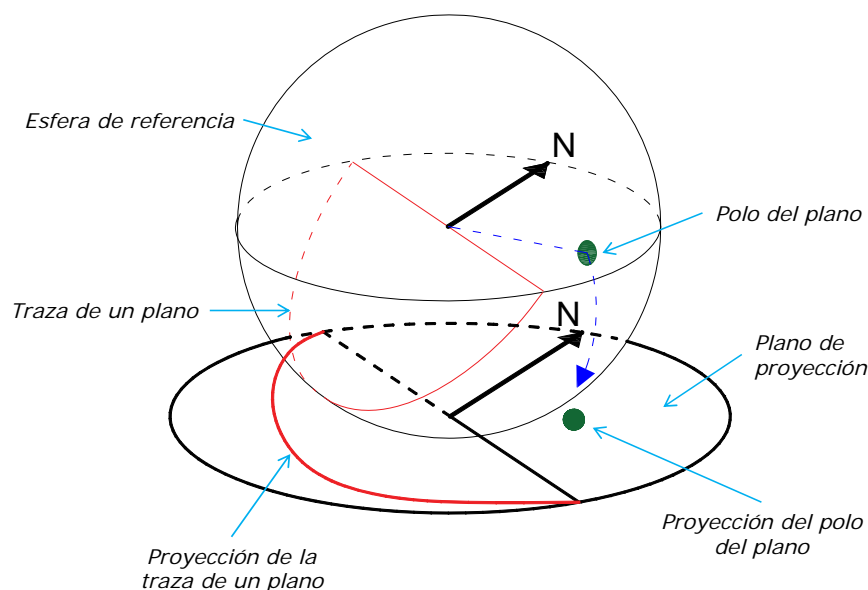


Figura 2. Representación de un plano y su polo en proyección estereográfica



Un plano puede representarse asimismo a partir de la normal al plano. En proyección estereográfica, cualquier línea que se quiera representar 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. Para el caso particular de la normal al plano, la proyección del punto intersección con el hemisferio inferior de la esfera de referencia se denomina "polo del plano", y es único para cada plano. Por tanto, en proyección estereográfica un plano puede representarse bien por su traza bien por su polo (el cual tendrá una inmersión complementaria al buzamiento del plano).

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, polos 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 vuelco (toppling)

5.1 Generalidades

El vuelco es un tipo de mecanismo de fallo que ocurre comúnmente en masas rocosas que están subdivididas por las fracturación del macizo en una serie de bloques o columnas aproximadamente verticales, de forma que éstos giran alrededor de un punto fijo y se produce el deslizamiento entre los propios bloques de roca.

Sin embargo, no todas las discontinuidades existentes en un macizo rocoso pueden llevar a la que se produzca un vuelco. 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 un vuelco

Para que se produzca vuelco los planos de discontinuidad deben ser sensiblemente paralelos al talud y aflorar abruptamente y con gran inclinación en él. Asimismo, el centro de gravedad de los bloques y columnas de roca en que las discontinuidades subdividen el macizo debe caer fuera de la dimensión de su base. Los vuelcos se caracterizan por tener movimientos horizontales significativos en su parte superior, pero muy reducidos en su pie. Para poder compatibilizar este movimiento diferencial entre el pie y la parte superior, debe darse el movimiento de todo el bloque, por lo que es necesario que se supere la fuerza de rozamiento máxima movilizable por fricción entre bloques.

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 en un macizo rocoso sólo algunas de las discontinuidades existentes conllevan un riesgo potencial vuelco.

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

- La dirección de buzamiento de las discontinuidades (asimiladas a planos) debe ser "sensiblemente" ortogonal a la dirección de buzamiento del talud. Por lo general, se considera que la diferencia entre la dirección de buzamiento de las discontinuidades y la dirección de buzamiento del talud debe encontrarse un rango de entre 160° y 200° (es decir $180^\circ \pm 20^\circ$).
- La inmersión de la normal a los planos de discontinuidad (en proyección estereográfica, la inmersión del polo de dichos planos) debe ser menor que la inclinación resultante de restar al buzamiento del talud el ángulo de rozamiento de los planos de deslizamiento (normalmente se toma el ángulo de rozamiento o fricción de las discontinuidades).

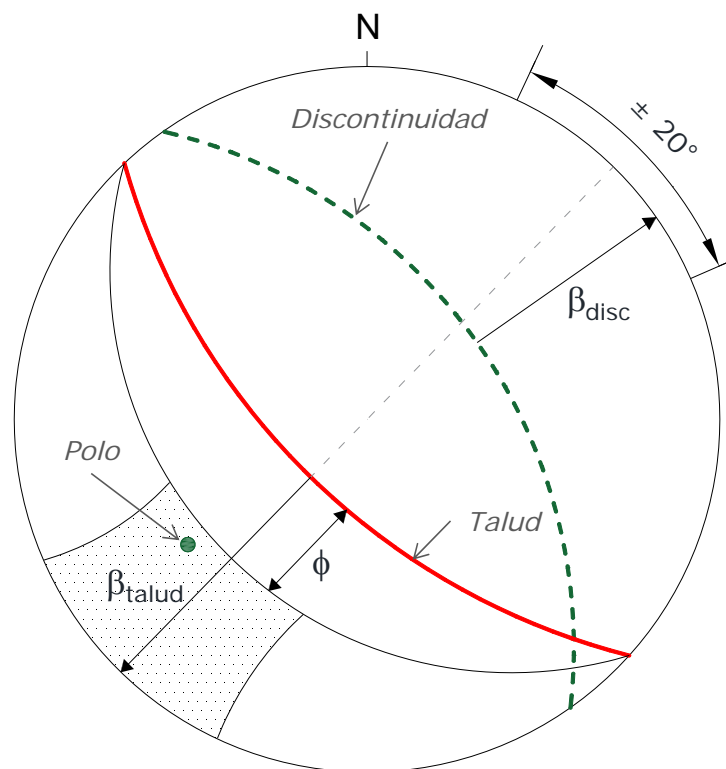


Figura 3. Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por vuelco. Toda discontinuidad cuyo polo caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de vuelco (cumple los condicionantes estructurales)

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 vuelco.

El primer ejemplo se recoge en la Figura 4a y muestra un macizo rocoso definido por tres familias de diaclasas (J) de orientaciones (buzamiento/ dirección de buzamiento): $25^\circ/180^\circ$, $60^\circ/235^\circ$ y $20^\circ/030^\circ$ (en verde). El ángulo de rozamiento de

las discontinuidades se considera de 20° . Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $80^\circ/060^\circ$ (en rojo).

Como puede verse, el diaclasado según $25^\circ/180^\circ$ y $20^\circ/030^\circ$ no puede ocasionar vuelco ya que la dirección de buzamiento de las discontinuidades y del talud no se encuentran dentro del rango $180^\circ \pm 20^\circ$. Por el contrario, las discontinuidades definidas por $60^\circ/235^\circ$ (cuyo polo corresponde con la línea definida por $30^\circ/055^\circ$) representa un riesgo potencial de vuelco, pues claramente se ve que se cumplen:

- La dirección de buzamiento de las discontinuidades (235°) está dentro del rango $180^\circ \pm 20^\circ$ respecto a la de la dirección de buzamiento del talud (060°).
- La inmersión del polo de las discontinuidades (30°) es menor que el resultado de restar el buzamiento del talud (80°) y el ángulo de rozamiento de las discontinuidades (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 las discontinuidades se considera de 20° para las diaclasas y 15° para la falla. Sobre este macizo se prevé ejecutar un talud de orientación $45^\circ/270^\circ$ (en rojo).

Como puede verse, en este caso, únicamente el diaclasado según $84^\circ/100^\circ$ representa un riesgo potencial de vuelco. Se deja al lector como ejercicio comprobar que efectivamente, para esta discontinuidad se cumplen todas las condiciones cinemáticas vistas anteriormente.

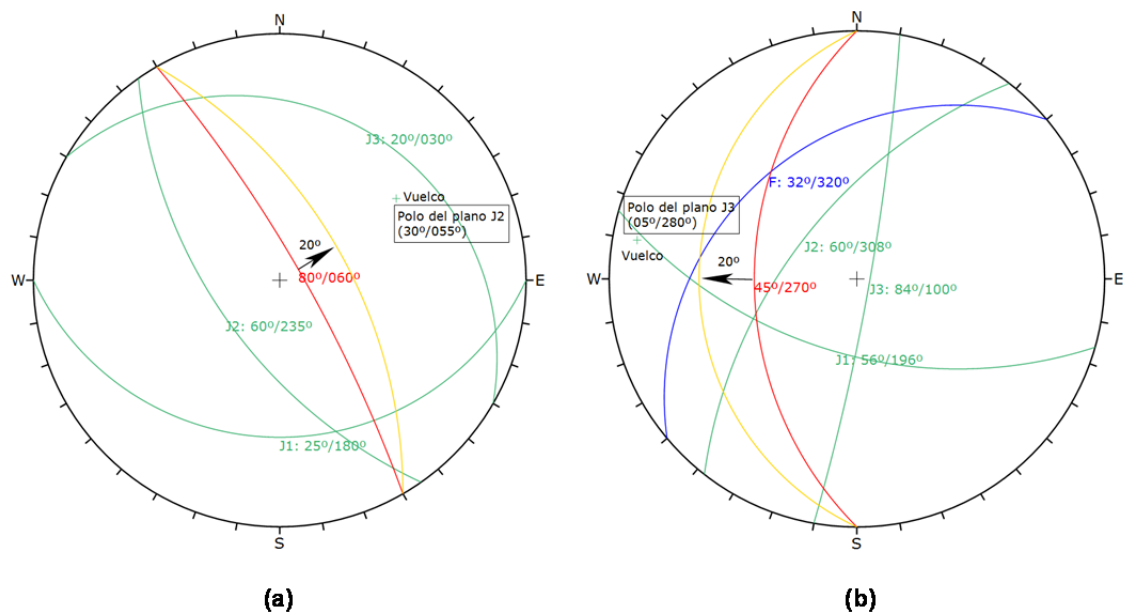


Figura 4. Ejemplos del análisis cinemático de estabilidad de taludes en roca por vuelco

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

- Talud definido según una orientación $30^\circ/000^\circ$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el primer ejemplo.

- Talud definido según una orientación $70^{\circ}/000^{\circ}$ ejecutado en el macizo rocoso definido en el segundo ejemplo.
- Talud definido según una orientación $60^{\circ}/130^{\circ}$ 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 vuelco (*toppling* en inglés).

Como se ha visto, para que exista la posibilidad de vuelco es necesario que se cumplan la siguientes condiciones: que la dirección de buzamiento de las discontinuidades y el talud sean “sensiblemente” ortogonales; que las discontinuidades afloren abruptamente y con gran inclinación en el talud; y que la inmersión de la normal a los planos de discontinuidad sea menor que la inclinación resultante de restar al buzamiento del talud el ángulo de 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.