
DESARROLLO DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

Tras la construcción de una obra lineal se hace necesaria la conservación de los taludes finales de la misma, para que no se pueda ver afectada por materiales erosionados o procedentes de dichos taludes. Esta conservación implica una sistematización de tareas que es preciso planificar. Esta nueva tecnología pretende determinar una serie de tareas previas a la sistematización de la conservación y proponer una serie de criterios a tener en cuenta en la toma de decisiones para la implantación del sistema de protección de taludes.

Esta nueva tecnología se está probando y testificando en este momento en un proyecto recientemente adjudicado a INCOYDESA INGENNYA en redacción para la Unidad de Carreteras de Huelva del Ministerio de Fomento, "Redacción de proyectos de construcción. 33-H-3920, 38-H-3970 y 39-H-3940. Provincia de Huelva"

La necesidad de la conservación de taludes y su sistematización

La necesaria conservación de los taludes tiene dos finalidades muy concretas, que son:

a) en primer lugar, evitar que se vea afectada por material procedente de los taludes de desmonte o por la erosión de los taludes de relleno la banda comprendida por las cunetas (en los desmontes) y las bermas o caces (en los rellenos), los arcenes exteriores, los carriles, los arcenes interiores y la mediana.

b) en segundo lugar, minimizar el coste global de mantener los taludes en buen estado y las reparaciones necesarias derivadas del objetivo anterior.

Como el resto de las tareas de conservación, hay que dedicar aún más esfuerzo a evitar problemas futuros que la resolución de los problemas actualmente planteados. Por ello, es preciso establecer metodologías de trabajo que incluyan las tareas de catalogación de operaciones de conservación, catalogación de fallos, inspección de los taludes y programación de las actividades necesarias. Sólo la implantación adecuada de estas metodologías permite afrontar de una manera eficaz la gestión del conjunto de los taludes.

Hay que señalar además, que los taludes suman una gran cantidad de metros cuadrados a los que es preciso minimizar la dedicación económica. Por ello, es imprescindible aprovechar los datos obtenidos a lo largo del período de construcción y servicio de la carretera, de manera que se puedan detectar si constante su situación es que indiquen la futura aparición de problemas que requerirán intervenciones de mayor entidad y, quizá, de una gran urgencia en su acometida.

Tareas previas a la sistematización de la conservación

Existen algunas tareas previas a la sistematización de la conservación. Estas tareas comprenden la revisión y digestión de los trabajos de planificación, proyecto, construcción y puesta en servicio de la carretera. Son las siguientes:

1) La generación de un documento 0 que reúna en una base de datos homogénea (preferiblemente un SIG) todas las características relevantes de los taludes.

2) La realización de un inventario informatizado de elementos de las márgenes

3) La realización del inventario informatizado de puntos críticos en la evolución futura de los taludes. Entre estos puntos cabe destacar las vaguadas colgadas en desmonte, las bocas de entrada en pozo en obras de drenaje transversal, los puntos de surgencia de agua en desmontes y, más raramente, en terraplenes y los puntos de la traza en los que existan aguas embalsadas, especialmente susceptibles de sufrir oleaje o velocidades muy rápidas de su corriente.

4) La adaptación de los catálogos de fallos, los catálogos de operaciones y los formatos de manuales generales a la realidad de un tramo concreto.

5) La recopilación de datos climatológicos de precipitación y evapotranspiración.

6) La instalación de algunas estaciones meteorológicas en el tramo, destinadas a recoger información de temperatura, intensidad de precipitación instantánea (especialmente en tormentas de duración inferior a dos horas) y helada.

7) Los datos conocidos son relación entre eventos meteorológicos y necesidades de conservación, especialmente los umbrales que implican la necesidad de una inspección de la carretera inmediatamente después de sufrir un evento meteorológico que superen este umbral, indicando preferiblemente el tramo de carretera que es preciso revisar.

Datos de desmontes

Es necesario elaborar una ficha con los datos que se indican a continuación para cada uno de los desmontes. Esta ficha no debe ocupar más de una página A4, disponiendo hojas adicionales para croquis y observaciones. Los datos necesarios son los que se muestran en la Tabla I siguiente.

P.K. Inicial	Cuneta de cabeza
P.K. Final	Bajantes (s/n, espaciamiento, ocasionales)
Altura máxima	Nivel freático
Longitud	Tramificación geotécnica del desmonte
Talud H:V	Columna geológica de cada tramo
Dir Buz / Buz	Tratamientos complementarios
Cuneta de Calzada	Observaciones
Reconocimientos disponibles	Fecha de última inspección
Berma de pie (s/n, anchura, exterior o interior a la cuneta)	Fecha de la última actualización de la ficha

La columna geológica debe referir los materiales a una base de datos de materiales del tramo. Cada uno de estos materiales se codificará a su vez indicando las variables indicadas en la Tabla II siguiente.

Denominación	Textura del material
Suelo / Roca / Tránsito	Angulo de rozamiento o RMR
Cohesión o resistencia compresión simple del macizo	Grado de alteración
	Erosionabilidad K

Si en el tramo concreto junto de materiales es difícil de codificar por la variación encontrada, es preferible añadir una ficha de materiales a cada uno de los taludes. Esta alternativa, sin embargo, es más laboriosa puede introducir confusión, ya que es posible que se dividan materiales que genética y morfológicamente son iguales en grupos diferentes, con evaluaciones y prescripciones diferentes, y con diagnósticos divergentes. Estas diferencias pueden aumentar a largo de la vida de la base de datos, por lo que si se elige esta alternativa es preciso realizar cada dos años una revisión global del tramo unificando los materiales descritos en la medida de lo posible.

Datos de relleno

Por su parte, los datos necesarios para los rellenos son los de la Tabla III siguiente. En los rellenos, y a efectos de la conservación de los taludes, no es preciso describir geológicamente los materiales a menos que sean evolutivos a corto plazo. Sí debe indicarse claramente si se trata de un terraplén, todo uno o pedraplén, y esto debe referirse al espaldón del relleno, esto es, al material existente en los primeros dos metros de espesor partiendo de la superficie vista.

P.K. Inicial	Textura del material
P.K. Final	Erosionabilidad K
Altura máxima	Alterabilidad
Longitud	Bajantes (s/n, espaciamiento, ocasionales)
Talud H:V	Tratamientos complementarios superficiales
Caz de Calzada	Observaciones
Evaluación de la evolución de los asientos	Fecha de última inspección

Material constituyente del relleno

Fecha de la última actualización de la ficha

Bermas en el talud de relleno

Factores de riesgo

Los factores que influyen en el riesgo son:

- El material constituyente.
- La geometría (altura y talud).
- La naturaleza de la superficie (material, elementos artificiales y plantaciones).
- La existencia de elementos a proteger fuera de la traza.
- La existencia de elementos a proteger fuera de la banda de ocupación.
- El descalce del pie.
- La carga en cabeza.
- Desnudar la superficie exterior.
- Agua exterior (erosión).
- Agua infiltrada (estabilidad y arrastre de finos).

Elementos del sistema

Los elementos del sistema son:

1. Sistema de toma de datos de los taludes
 - a. Geometría del talud y del exterior (vierte o no).
 - b. Resistencia de los materiales.
 - c. Centralizado o descentralizado.
2. Sistema de vigilancia de actividad humana.
 - a. Vigilancia mediante inspecciones de personal (tramos cortos).
 - b. Vuelos o satélite (sistema complejo).
 - c. tratamiento automático de imágenes
3. Caracterización del clima.
 - a. Régimen de tormentas.
4. Estimación de modos de erosión superficial probables en los próximos dos años.
5. Estimación de actividades de conservación.

Niveles de intervención

Se pueden prever tres niveles de intervención

- Rutinaria
- Principal
- Especial

Catalogo de fallos en taludes

En desmontes

- a) Asientos en cabeza,
 - cuando existen elementos naturales o artificiales que pueden sufrir daños.
- b) Caída de piedras.
- c) Erosiones:

-
- a. denudado superficial.
 - b. erosión en regueros generalizada, profundidad menor de 0,3 m.
 - c. erosión en regueros generalizada, profundidad mayor de 0,3 m.
 - d. erosión en regueros localizados.
- d) Inestabilidades locales:
- a. fallos rotacionales superficiales.
 - b. fallos de piel.
- e) Inestabilidad general (no se trata en este manual, si se detecta se derivaría).

En rellenos

- f) Erosiones:
- a. denudado superficial.
 - b. erosión en regueros generalizada, profundidad menor de 0,3 m.
 - c. erosión en regueros generalizada, profundidad mayor de 0,3 m.
 - d. erosión en regueros localizados.
- g) Inestabilidades locales:
- a. fallos de piel.
 - b. fallos localizados.
- h) Asiento excesivo del relleno (no se trata en este manual, si se detecta se derivaría).
- i) Asiento excesivo del cimientado (no se trata en este manual, si se detecta se derivaría).
- j) Inestabilidad general (no se trata en este manual, si se detecta se derivaría).

Fallos más frecuentes

Los defectos de desmontes son más frecuentes. Se pueden dar todos los tipos.

En los rellenos, los defectos más comunes son los asentamientos y las erosiones. Las inestabilidades ocurren más frecuentemente cuando la pendiente transversal de la superficie de apoyo es demasiado elevada.

En ambos casos existen riesgos de otros subsistemas, sobre todo drenaje (erosiones y aterramientos) y calzada (obstáculos y deformaciones).

Codificación de operaciones de conservación de taludes

Puede desarrollarse un sistema de codificación de operaciones que ayude a clasificarlas, permitiendo al mismo tiempo la adición de operaciones nuevas, partiendo de un catálogo inicial más reducido. Este sistema tiene la ventaja de no ser estático y poder ser mantenido y aumentado en la obra.

Para la codificación de las operaciones de conservación se sigue el siguiente criterio (Romana, modificado sobre Tejada y Galíndez, trabajo de doctorado, 1996): cada operación se codifica empleando un conjunto de seis cifras, con este significado de cada una:

- CT: Conservación de Taludes
- C1 (un dígito): clasificación general del efecto del tratamiento u operación
 - 1: Medidas pasivas en el sistema de drenaje.
 - 2: Medidas pasivas sobre el talud.
 - 3: Medidas activas sobre la vegetación.
 - 4: Medidas activas sobre la superficie.
 - 5: Tratamientos discontinuos en el talud.
 - 6: Tratamientos especiales.
 - 7: Medidas de control de regueros.

-
- C2 (un dígito): tipo de solución por familia: en la actualidad hay familias de tratamientos superficiales (no resistentes o resistentes) y de tratamientos especiales.
 - C3 (dos dígitos): solución constructiva dentro de la familia o tipo.

Algunos ejemplos de operaciones de conservación de taludes

Siguiendo la codificación anterior, pueden darse algunos ejemplos, no pretendiéndose en este texto que el catálogo sea completo para todos los casos.

- 1) Hidrosiembras. Código CT3101.
- 2) Esteras de matorral. Código CT3104.
- 3) Geotextil volumétrico de polipropileno. Código CT4101.
- 4) Malla de triple torsión tendida. Código CT4201.
- 5) Malla de triple torsión anclada. Código CT4201.
- 6) Malla de triple torsión sobre geomalla de polipropileno. Código CT4208.
- 7) Malla metálica adosada con bulones y reforzada con cables. Código CT4203.
- 8) Red de cables y malla de triple torsión. Código CT4209.
- 9) Hormigón proyectado convencional. Código CT4301.
- 10) Hormigón proyectado orgánico. Código CT4302.
- 11) Hormigón proyectado con tratamiento superficial. Código CT4303.
- 12) Bajantes localizadas. Código CT5101.
- 13) Fajinas. Código CT5103.
- 14) Estabilización local con escollera. Código CT5104.
- 15) Contención de pie con escollera. Código CT6101.
- 16) Contención de pie con gaviones. Código CT6102.

Criterios generales para la decisión de la implantación de un sistema de protección de talud

Para decidir si es necesario o no disponer un sistema de protección del talud en los desmontes se puede utilizar un sistema de puntos de riesgo, en el que se van acumulando los debidos a unas circunstancias desfavorables relacionadas con el entorno climático, y se caracteriza el conjunto de la estructura del firme y de la explanada mediante unos puntos acumulados de resistencia a las caídas.

Nótese que el objetivo final del sistema es disponer de elementos de decisión y priorización de las operaciones de conservación y construcción en taludes, por lo que lo más importante es el resultado relativo de cada puntuación.

Se descarta así la inclusión de algunos aspectos, tales como si se trata de una carretera local, general, nacional, autopista o vía considerada crítica, o directamente la intensidad media diaria de vehículos. También se descarta explícitamente el empleo del sistema para adoptar decisiones referentes a taludes de puntos en los que puedan existir personas detenidas, tales como áreas de descanso, áreas de servicio, centros de conservación u otros desviar naturaleza.

La comparación de los puntos de riesgo con los de la resistencia proporciona una buena información sobre la necesidad de disponer los elementos de protección. La decisión final debe, asimismo, tener en cuenta:

- La importancia de la carretera (estimada, por ejemplo, por su IMD), relacionada con la perturbación a la circulación que pueden causar los desperfectos causados por la falta de estos sistemas, y las reparaciones eventualmente necesarias.
- La dificultad de acceso durante la vida de la obra: cuanto mayores sean las dificultades de acceso, más conveniente es disponer un sistema de protección duradero.

-
- Los costes de la instalación y del mantenimiento del sistema. Se trata, en suma, de decidir si se van a aumentar los correspondientes a la inversión inicial en la carretera, o los de su conservación durante su vida útil, así como los costes de la explotación (soportados directamente por los usuarios, especialmente las circulaciones en una calzada de autopista en doble sentido, las congestiones causadas por las operaciones de conservación y las interrupciones del servicio. La comparación suele resultar sesgada a favor de la primera alternativa, por el aumento de su vida útil que tiene una estructura de firme bien drenada.
 - La historia anterior de caídas o erosiones en cada una de las obras. Aspectos que inciden en el riesgo Los aspectos del problema que configuran el riesgo de erosión o desperfecto de los taludes son:
 - 1) La agresividad del clima.
 - 2) La altura del talud.
 - 3) La pendiente del talud, especialmente en el caso de pendientes muy elevadas en materiales que no tengan una cohesión superior a los 50 kPa (5 kp/cm²).
 - 4) El tamaño de bloque (en rocas).
 - 5) La existencia de materiales con diferente resistencia a la erosión.

Aspectos que inciden en el riesgo

Los aspectos del problema que configuran el riesgo de erosión o desperfecto de los taludes son:

- 1) La agresividad del clima.
- 2) La altura del talud.
- 3) La pendiente del talud, especialmente en el caso de pendientes muy elevadas en materiales que no tengan una cohesión superior a los 50 kPa (5 kp/cm²).
- 4) El tamaño de bloque (en rocas).
- 5) La existencia de materiales con diferente resistencia a la erosión.

Aspectos que inciden en la resistencia

Los aspectos del problema que configuran la resistencia del conjunto talud calzada a la erosión o desperfecto de los taludes son:

- 1) La resistencia del material.
- 2) La presencia de cunetones o sistemas de protección al nivel de la calzada.
- 3) La presencia de pantallas dinámicas adecuadas en el talud.
- 4) La existencia de bermas exteriores que permitan retrasar la retirada de materiales, adecuándola a las necesidades de optimización de la conservación del tramo.

La valoración del riesgo de fallo

La valoración del riesgo puede abordarse de dos maneras distintas:

- a) Determinista: si se opta por el modelo determinista, la función que se obtiene es:

$$R(\text{talud}) = F(\text{clima}) + G(\text{geometría}) + H(\text{tamaño de caída}) + I(\text{heterogeneidad}).$$

- b) Estocástico: en este caso se introduce una variabilidad en algunos factores, especialmente en las funciones F y H $R(\text{talud}) = F_i(\text{clima}) + G(\text{geometría}) + H_j(\text{tamaño de caída}) + I(\text{heterogeneidad})$

La primera manera es apropiada para casos en los que los datos son limitados, los plazos de vida largos, y las decisiones pocas y no estudiadas con un criterio estrictamente de riesgo y economía, tales como estudios informativos y proyectos. La segunda es indicada cuando el estudio económico tiene en cuenta el riesgo, como concesiones ya adjudicadas y contratos de conservación, siempre respetando los indicadores y penalizaciones que imponga cada contrato.

En la agresividad del clima influyen sobre todo dos aspectos: el régimen de precipitaciones (intensidad y variabilidad) y la existencia de heladas (frecuencia e intensidad).

La valoración de la geometría incluye un factor de longitud de talud y otra de pendiente, de manera similar a la expuesta por Israelsen (1980) para la consideración de la erosión.

Por tamaño de caída se entiende el bloque único o conjunto de partículas que fallan al mismo tiempo.

En el caso de que los taludes sean heterogéneos, debe considerarse el talud en cada material independientemente.

La valoración de la resistencia

En suelos, la puntuación se deriva de las propiedades físicas (textura), hidráulicas (permeabilidad), y cohesión). En rocas, pueden considerarse factores como el SMR (Romana) o algunos subfactores del RHRON (Senior).

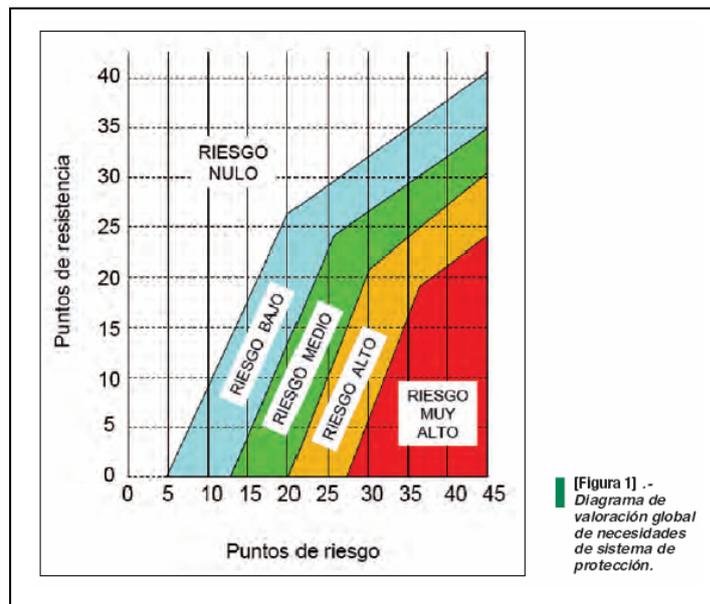
La presencia de vegetación en el talud contribuye a la resistencia en función de la proporción de la superficie cubierta y la vida media de las especies.

Los sistemas de protección dispuestos añaden resistencia mediante un factor multiplicador (si son tratamientos en toda la superficie) o suma (si son discontinuos).

La presencia de barreras y cunetones en la calzada, o bien de pantallas dinámicas adecuadas y en buen estado de conservación añade puntos de resistencia que suman al total. Lo mismo ocurre con la existencia de bermas exteriores que permitan almacenar materiales caídos de los taludes es un punto de mucha resistencia, si estas bermas tienen más de 0,50 m de anchura, ya que es posible programar la retirada de materiales caídos con total comodidad, salvo que se presente un fenómeno meteorológico claramente extraordinario.

Valoración global de necesidades de sistemas de protección

La valoración global de necesidades de actuaciones de conservación puede hacerse siguiendo el diagrama de la Figura siguiente:



El diagrama y las decisiones pertinentes deben afinarse para cada tramo, y son un sistema semiobjetivo, que permite jerarquizar comprendiendo los efectos de cada factor de riesgo y cada factor de resistencia, lo que, obviamente, no excusa de abordar actuaciones que pueden ser evidentes en casos concretos.

En principio, en las zonas de riesgo nulo no hay que programar ninguna actividad de conservación ordinaria, en las de riesgo bajo hay que limpiar periódicamente, en la de riesgo medio hay que elegir entre conservar al dictado de los fenómenos meteorológicos o disponer tratamientos superficiales, en la de riesgo alto es muy aconsejable disponer tratamientos superficiales de

cierta intensidad, y en la de riesgo muy alto es imprescindible disponer tratamientos costosos por unidad de superficie.

Recomendaciones de actuación

Se adjuntan a continuación un ejemplo de los cuadros resultantes donde se pueden observar varios tipos de recomendaciones según el estado de posibles taludes:

Evaluación de taludes para su conservación
FUNDACIÓN AGUSTÍN DE BETANCOURT

	TALUD 1	TALUD 2	TALUD 3
Riesgo	24	21	18
Resistencia	10	10	11
Zona de riesgo	MEDIO	BAJO	MEDIO
Daños observados	Reguero		Chinacos y caídas pequeñas
Recomendación 1	No hacer nada. Limpieza anual sistemática	No hacer nada. Limpieza anual sistemática	No hacer nada. Limpieza anual sistemática
Recomendación 2	Malla de triple torsión. Limpieza y conservación		Malla de triple torsión. Limpieza y conservación
Recomendación 3			
Observaciones	Demolición vertical para tratamientos no resistentes. Conviene hacer una tajante localizada. Se debe hacer un estudio localizado en los cuarteles del comercio.	La intercalación beneficia, ya que la altura del arenal erosionable es solo para los cortes de cuarteles.	

Aplicación de la tecnología expuesta a un caso práctico. Taludes del Proyecto de construcción. 33-H-3920, 38-H-3970 y 39-H-3940 en la carretera A-49 en la Provincia de Huelva actualmente en redacción en INCOYDESA INGENNYA

Este trabajo actualmente en inicio se está utilizando esta tecnología. Para ello se han iniciado las actividades siguientes que se irán complementando en fases posteriores del proyecto:

- Pedir los datos de pluviometría de las estaciones
- Elaborar una cartografía geológica (SG):
 - Distinguiendo niveles dentro de las unidades
 - Centrada en las unidades que afloran
 - Distinguiendo unidades con gravas y sin ellas
 - Distinguiendo (si fuera posible, creo que no lo será) unidades con limos o con arcillas
- Pasar esa cartografía a las fotos aéreas (vuelo, si se consigue, o SIGPAC)
- Hacer un inventario con video de la carretera
- Hacer una ficha de cada talud, indicando:
 - Altura
 - Inclinación
 - Elementos en clave del talud, o en las inmediaciones
 - De gran importancia
 - De importancia media
 - Poco importantes
 - Ninguno
 - Unidades geológicas
 - Daños
 - % de vegetación
 - Estado del pie de talud (erosión/vegetación/sano)
 - % de longitud de talud con cárcavas
- Elaborar un catálogo de operaciones posibles (MRG)
 - Para una lista de unidades de obra
 - Para discutir la viabilidad de las actuaciones