

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PARA PROYECTOS VIALES

METHODOLOGY OF SLOPE STABILITY ANALYSIS TO HIGHWAY PROJECTS

Ing. Alicia Alpízar Barquero
CACISA, Gerente de Geotecnia, aalpizar@cacisa.cr

RESUMEN

Las metodologías para el análisis de la estabilidad de taludes de macizos rocosos, se basan en evaluaciones de campo, exploración mecánica, prospección e interpretación sísmica, clasificación geomecánica de macizo rocoso, modelación de la estabilidad mediante análisis de equilibrio límite, o a partir del índice SMR o el Q_{slope} para taludes.

Muchas veces el tiempo, los costos o la falta de normativa, hacen que todos estos procesos sean desestimados en proyectos viales, generando deficiencias de diseño que trae asociados problemas de operación en vías de gran importancia. La presente investigación se propone con el objetivo de ser un documento base que puede ser utilizado como herramienta de referencia en el análisis de taludes para proyectos viales en estado preliminar y de diseño, abarcando desde la caracterización de su riesgo, el método de exploración a utilizar, hasta la modelación de su estabilidad o indicación de su índice de estabilidad.

ABSTRACT

The slope stability analysis of rock mass methods, are based on site evaluation, mechanical exploration, prospecting and seismic interpretation, geomechanics of rock mass classification, modeling of the stability by limit equilibrium analysis, or from the SMR index or Q_{slope} for slopes.

Often the time, the cost or the lack of rules, makes all these processes be overlooked in highway projects, generating deficient designs that brings associated operating problems in routes of great

importance. The present research has the object to be a document base that can be used as tool of reference in the slope stability analysis for highway projects in preliminary and design conditions, including from the characterization of the risk, the method of exploration to using, up to the modeling of the stability or indication of the index of stability.

INTRODUCCION

Costa Rica tiene una extensión de 51 100 km², con un sistema vial que se estima en 35 884 km aproximadamente de longitud. Según un informe del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) del año 2002, este sistema vial se puede clasificar en dos grupos de atención y un grupo no clasificado: 1) Red Vial Nacional que está constituida por 7 429 km de los cuales el 60,55% están pavimentados, el 38,60% se encuentra en lastre o grava; y 2) Red Vial Cantonal constituida por 24 641 km de los cuales el 14,45% están asfaltados, el 85% está en lastre o grava; y 3) Grupo No Clasificado que corresponde al 15,47% del sistema vial nacional.

Gran parte del sistema de carreteras se ubica dentro de zonas montañosas de alta pendiente, que aunque no se tiene un estimado real del porcentaje que abarca, por la experiencia y lo claramente observado en nuestras vías nacionales, se podría estimar que más del 50% de nuestro sistema vial se encuentra directa o indirectamente afectado por cortes o rellenos de laderas, conformando así grandes extensiones de taludes en proyectos viales.

Basada en estos números y en la experiencia en materia de geotecnia para proyectos viales, donde además, se evidencia una falta de normativa clara para este tipo de estudios, surge la idea de presentar una propuesta metodológica para el análisis de la estabilidad de taludes en proyectos viales, basada en evaluaciones de campo, exploración mecánica, prospección e interpretación sísmica, clasificación geomecánica de macizos rocoso, modelación de la estabilidad mediante análisis de equilibrio límite, o a partir del índice SMR para taludes, según corresponda.

La propuesta metodológica planteada es fundamentada en criterios profesionales definidos por la experiencia en estudios para este tipo de proyectos, la investigación de normativas y experiencias aplicadas en otros países, que pueden ser empleadas en nuestro medio y/o ajustadas a nuestras necesidades.

El enfrentar proyectos viales enmarcados en zonas con grandes problemas de inestabilidad de taludes, muchas veces no evidenciados ni solucionados en las etapas preliminares, indica una necesidad de desarrollar una metodología básica pero a la vez específica que permita detectar de una manera fácil y sistemática zonas potenciales de riesgo por inestabilidad, clasificación de estas zonas y un procedimiento de exploración y análisis de acuerdo a sus características

Si bien es cierto, en las etapas preliminares y de diseño del proyecto, muchas veces no se cuenta con los accesos adecuados para la exploración convencional o con los recursos suficientes para desarrollarla; esta investigación pretender brindar una guía de trabajo con opciones para

desarrollar exploraciones alternativas, que permitan calibrar un modelo geotécnico aplicable a las teorías convencionales de estabilidad de taludes o a través de índices como el SMR

MARCO TEORICO

La estabilidad de un talud se define en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad o de un índice definido por una clasificación geomecánica. En el caso de los macizos rocosos toda la caracterización y análisis se basará en las teorías de la Mecánica de Rocas y algunos aportes de la Mecánica de Suelos cuando se requiera la caracterización de matrices de suelo detectadas.

La “Mecánica de Rocas” se puede definir como la parte de la Geotecnia que se ocupa del estudio de las propiedades y del comportamiento mecánico de los materiales rocosos, con el fin de conocer cuál va a ser su respuesta cuando se vean sometidos a la acción de determinados esfuerzos.

Un rasgo fundamental que caracteriza a los macizos rocosos y que da origen a su comportamiento característico es la existencia de defectos de la matriz rocosa; y estos defectos aparecen a cualquier escala: microscópica (red cristalina, separación entre granos, bandas de deslizamiento, etc) o macroscópica (discontinuidades o planos de falla). (Serrano, 2006)

Desde el punto de vista de la ingeniería, la finalidad principal de la mecánica de rocas es la de conocer y predecir cuál va a ser el comportamiento mecánico de la roca o del macizo rocoso ante la realización de una determinada obra de ingeniería.

Si bien es cierto el macizo rocoso es un medio discontinuo (debido a la presencia de discontinuidades de diferente origen); heterogéneo y anisotrópico (por la existencia de zonas con diversos grados de alteración, contenidos de agua diferentes, presencia de planos de estratificación, de fallas, de familias de diaclasas, etc); y su comportamiento está condicionado por la resistencia al corte de sus discontinuidades; nada de esto puede justificar la ausencia de una exploración y análisis adecuado.

Tal y como indican Hoek y Bray en unos de sus libros *“La falta de conocimiento y de precisión en la obtención de las propiedades del material, no justifica el no hacer un estudio minucioso del equilibrio de la masa rocosa en estudio. Solamente el hecho de utilizar un método matemático más preciso ayudaría a compensar un poco estas imprecisiones inevitables”* (Hoek y Bray, 1981). Y como ampliación a esta frase se podría decir que el uso de un sistema de clasificación geomecánico adecuado nos puede ayudar también a compensar estas imprecisiones.

Caracterización del Macizo Rcoso

El macizo rocoso es un conjunto de bloques de matriz rocosa y de discontinuidades (o defectos de la matriz rocosa) existentes. La matriz rocosa por su parte es el material rocoso exento de

discontinuidades o los bloques de “roca intacta” que quedan entre dichos planos, las discontinuidades son planos que se deben a procesos de rotura sufridos en el pasado por el macizo rocoso o de origen sedimentario.

Según Goodman (1989), las propiedades índices de la roca son:

- Peso Específico y Densidad
- Porosidad
- Velocidad Sónica
- Durabilidad
- Resistencia
- Permeabilidad

En la tabla 1 se muestra la información que suministra cada propiedad índice de la roca y las correlaciones que se pueden dar a partir de estas propiedades.

Tabla 1: Propiedades Índice de la Roca y sus correlaciones

Propiedad Índice	Información	Correlaciones
Peso Específico y Densidad	Mineralogía de la roca y su compacidad	Resistencia – Densidad
Porosidad	Cantidad de huecos que tiene la matriz rocosa. Junto con la densidad informan sobre el grado de alteración y facilitan el uso de correlaciones muy útiles sobre el comportamiento mecánico.	Porosidad – Compresión Porosidad – Densidad – Índice de Alteración Índice de Alteración – Modulo de Elasticidad Resistencia al Esfuerzo Cortante – Índice de Alteración
Velocidad Sónica	Sola o junto con la descripción petrográfica permite conocer el grado de alteración y fisuración. Permite predecir el comportamiento mecánico.	Velocidad de Onda – Módulo de Young – Peso Específico Velocidad de Onda – Módulo de Rigidez Transversal – Peso Específico Módulo de Young – Módulo de Rigidez Transversal – Coeficiente de Poisson dinámico Índice de Calidad de la Roca – Velocidad de Onda del Testigo – Velocidad de Onda Teórica
Durabilidad	Estabilidad química y física de la roca	Clasificación del Comportamiento – Índice de Durabilidad
Resistencia	Evalúa cuantitativamente el	Resistencia Carga Puntual –

	comportamiento mecánico de la roca. Prácticamente imprescindible en cualquier estudio de mecánica de rocas.	Resistencia a Compresión Simple – Coeficiente de Correlación K
Permeabilidad	Brinda información respecto a los poros y fisuras interconectadas de la roca matriz. Es muy complejo su ensayo por lo que no se considera de manera general en el análisis de propiedades índice.	-

Los defectos de la matriz rocosa por su parte son planos de debilidad que se pueden definir como:

- Discontinuidad: puede ser estrecha (fisura) o amplia (zona de debilidad) que vuelve la masa rocosa discontinua, con presencia de algún material de relleno como arcilla, arena, partículas de roca o la misma roca alterada.
- Falla: fractura de origen natural que convierte la roca en una masa totalmente discontinua, y no tienen material de relleno.

Los parámetros que caracterizan los defectos del macizo rocoso se pueden dividir en dos grupos:

- Parámetros relativos al sistema de macizo – familias de defectos
- Parámetros relativos a las familias de defectos en sí.

En la tabla 2, se muestran los parámetros que caracterizan los dos grupos indicados anteriormente:

Tabla 2: Parámetros de los defectos del macizo rocoso (Serrano, 2006)

Grupo	Parámetros
Macizo – Familias de Defectos	Número de familias de discontinuidades
	Orientación
	Espaciamiento
	Tamaño y forma de los bloques
	Persistencia
Familias de Defectos	Apertura
	Rugosidad
	Estados de las paredes de la junta
	Relleno de la discontinuidad
	Condiciones Hidráulicas

Métodos Exploratorios y de Análisis

Existen un sinnúmero de métodos exploratorios que se pueden utilizar tanto para la caracterización de la matriz rocosa como para los defectos del macizo rocoso. Para los efectos de esta propuesta se recomienda realizar una prospección geotécnica formada por los siguientes tipos de investigación:

- Ensayos de refracción sísmica.
- Levantamiento geomecánico de los macizos rocosos para la evaluación del RMR (Rock Mass Ratio de Beniaowski), el Sistema Q de Barton, del GSI (Geological Strength Index) y el SMR (Slope Mass Rating de Romana).
- Galerías de Exploración a Cielo Abierto con toma de muestras alteradas y/o inalteradas.
- Sondeos Mecánicos con extracción continua de testigos. Mediante sistema de rotación con broca de punta de diamante en los estratos rocosos y ensayos SPT en las capas de suelo.

Los *ensayos de refracción sísmica* estudian de forma no destructiva el subsuelo terrestre a través de la propagación de las ondas sísmicas producidas por una fuente artificial. Es una herramienta básica para explorar en forma rápida y económica grandes áreas, permitiendo obtener con relativa precisión los espesores de los estratos y las velocidades de ondas P, y de ondas S en algunos casos. Este método permite representar el perfil del subsuelo con resolución vertical general, ya que no es posible diferenciar capas delgadas.

Barton (2011), muestra una serie de graficas de correlación entre la velocidad de onda y la calidad de roca, grado de deformación y la permeabilidad. En la figura 1 se muestra una gráfica que correlaciona la velocidad de onda P (V_p) con los índices de RQD y Q.

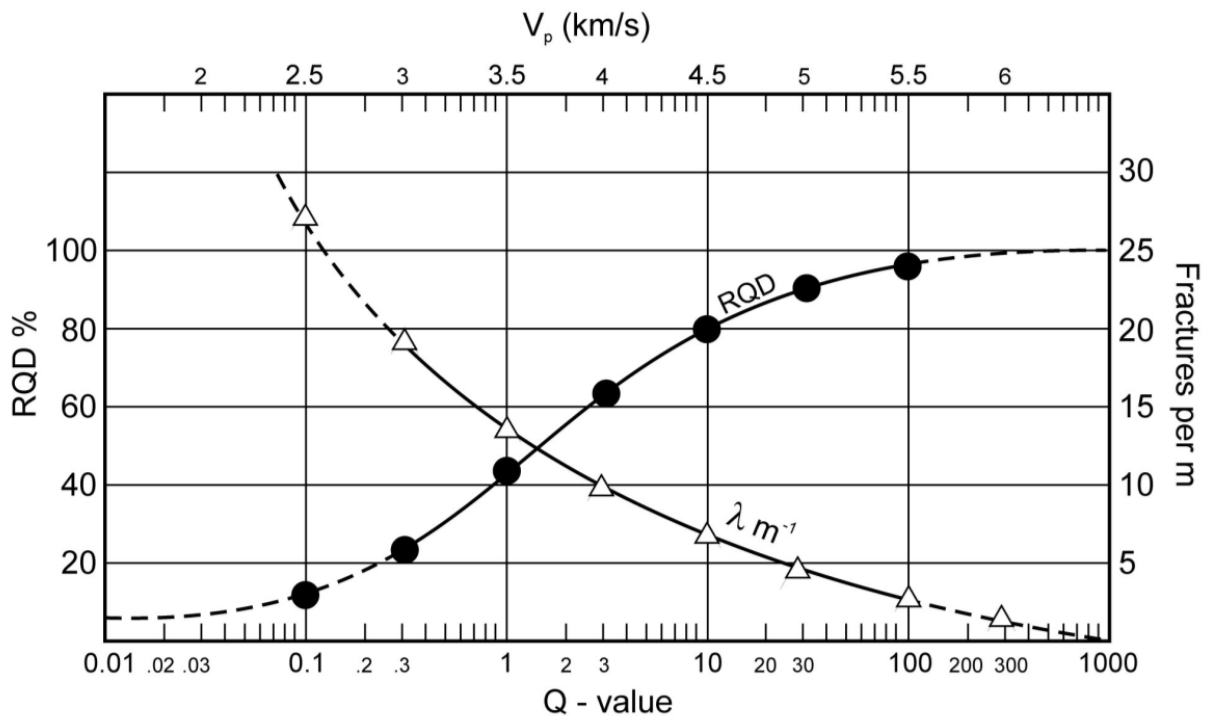


Figura 1: Relación de la V_p con el índice de calidad de rocas RQD y Q (Barton, 2011)

De manera integral, Barton (2011) además presente una gráfica que relaciona el índice de calidad Q, V_p , espesor, matriz de suelo y módulos de deformación; e indica una ecuación lineal directa que relaciona la velocidad de onda P con el índice de calidad de roca Q y corresponde a la expresión indicada en la ecuación (1).

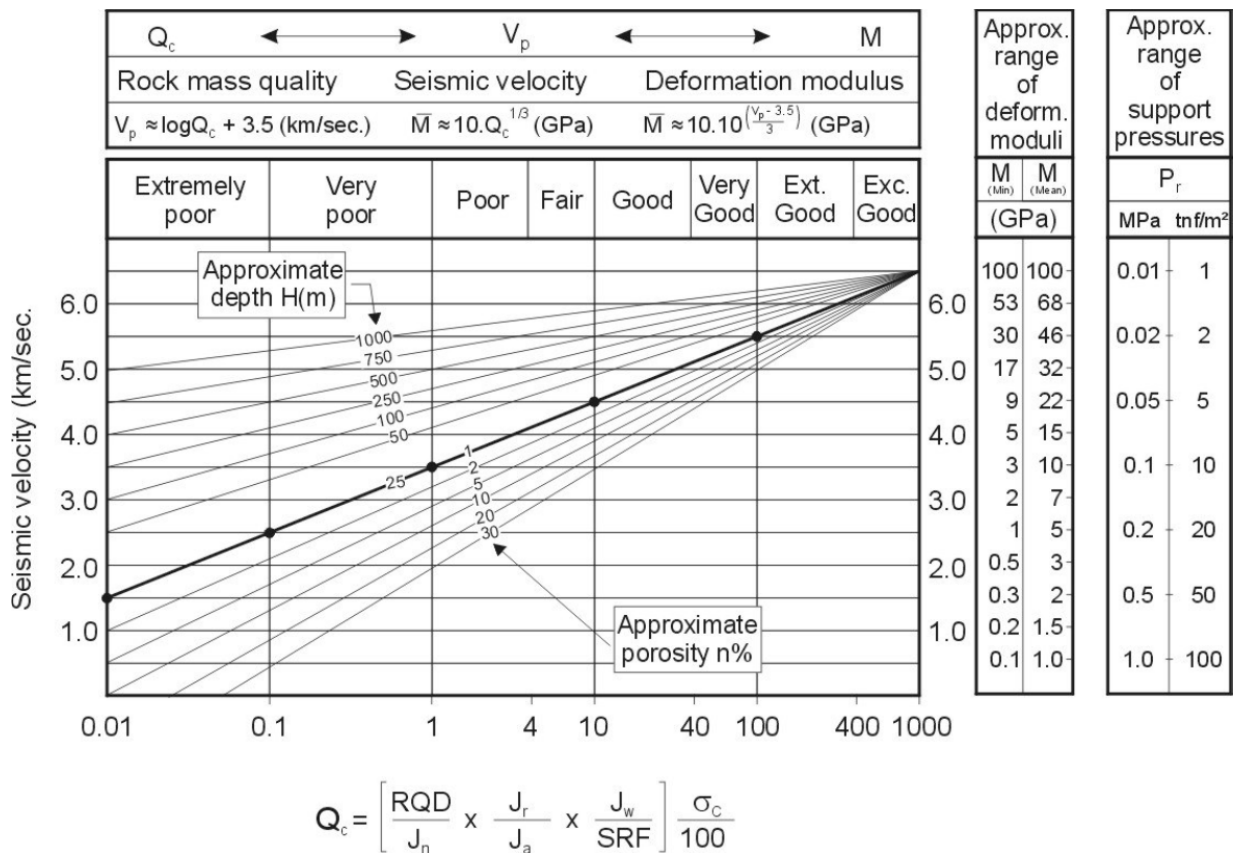


Figura 2: Relación del índice de calidad Q, Vp, espesor, matriz de suelo y módulos de deformación (Barton, 2011)

$$V_p \approx 3,5 + \log Q \tag{1}$$

Mediante todas estas correlaciones, Barton refleja el potencial que poseen los ensayos de refracción sísmica para ser aprovechados de manera adecuada en la exploración del subsuelo para el análisis de la estabilidad de taludes en tantos sitios donde podría ser realmente un medio para caracterizar todas esas propiedades que hasta hoy nos ha sido difícil obtener.

Por otro lado, Serrano (2006) nos indica que la caracterización de macizos rocosos mediante *clasificaciones geomecánicas*, se ha impuesto como una de las herramientas más poderosas disponibles en la mecánica de rocas.

La primera clasificación moderna de los macizos rocosos fue la de Terzaghi (1946). Posteriormente han surgido muchas otras que han incorporado en sus criterios tanto avances de orden teórico como tecnológico; y aunque todas surgieron como una respuesta a las necesidades

del área de túneles; ya existen aunque en muchos casos muy empíricamente, adaptaciones de estas teorías al análisis de estabilidad de taludes.

Por su parte la clasificación geomecánica del *RMR de Bieniawski*, que fue propuesta en 1973 y actualizada varias veces hasta su última versión de 1989, ha sido la base para varias metodologías de análisis de estabilidad de taludes que entre ellas podemos citar a Romana (1985) y Robertson (1988). Para nuestro análisis proponemos el uso de la metodología SMR, el cual corresponde a un método para determinar los factores de corrección adecuados para aplicar la clasificación RMR a taludes.

La clasificación SMR nos brinda:

- Una división en clases de estabilidad
- El riesgo de inestabilidad que se corre en cada forma posible de rotura: Plana o Cuña, Vuelco o Rotura en Masa
- Sugiere recomendaciones para métodos de soporte y/o corrección

La relación que sugiere Romana para esta clasificación es la mostrada en la ecuación (2) y comprende un "factor de ajuste", que función de la orientación de las juntas (y producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" que depende del método utilizado.

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (2)$$

El factor de ajuste de las juntas es producto de tres subfactores (ver tabla 3):

- **F1** depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30° y la probabilidad de rotura es muy baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

$$F1 = (1 - \text{sen } a_j - a_s)^2 \quad (3)$$

Donde a_j y a_s son los valores del buzamiento de la junta (a_j) y del talud (a_s).

- **F2** depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1,00 (para juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para juntas con buzamiento inferior a 20°). Fue establecido empíricamente pero puede ajustarse aproximadamente según la relación:

$$F2 = (\text{tg}^2 b_j)^2 \quad (3)$$

Donde b_j es el buzamiento de la junta. F2 vale 1,00 para las roturas por vuelco.

- **F3** refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por BIENIAWSKI en 1976 que son siempre negativos.

Tabla 3: Factores de Ajuste para las Juntas (F1, F2 y F3) para SMR (Romana,1985)

Caso		Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
P	aj-as	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
T	aj-as-180°					
Valor F1 (P/T)		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	bj	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
Valor F2 (P)		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Valor F2 (T)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
P	bj-bs	> 10°	10° - 0°	0°	0°-(-10°)	< -10°
T	bj+bs	< 110°	110°-120°	>120°		--
Valor F3 (P/T)		0	-6	-25	-50	-60

Donde;

P = Rotura Plana

T = Rotura por vuelco

as = dirección de buzamiento del talud

bs = buzamiento del talud

aj = dirección de buzamiento de las juntas

bj = buzamiento de las juntas

El factor de ajuste por excavación se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Factor de Ajuste según Método de Excavación (Romana, 1985)

Método	Talud Natural	Precorte	Voladura Suave	Voladura o Mecánico	Voladura Deficiente
F4	+15	+10	+8	0	-8

La clase de estabilidad según la clasificación SMR se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Descripción de las Clases SMR (Romana, 1985)

Clase N°	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy Mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente Estable	Estable	Totalmente Estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas Juntas o muchas Cuñas	Algunos Bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Asociado a la clasificación SMR y al tipo de rotura del macizo rocoso, Romana (1985) sugiere una frecuencia de inestabilidades posible que se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Tipo de inestabilidades observadas

Tipo de Rotura	Intervalos SMR	Frecuencia
PLANAS	SMR > 60	Ninguna
	60 > SMR > 40	Importantes
	40 > SMR > 15	Muy Grandes
EN CUÑA	SMR > 75	Muy Pocas
	75 > SMR > 49	Algunas
	49 > SMR > 40	Muchas
POR VUELCO	SMR > 65	Ninguna
	65 > SMR > 50	Menores
	40 > SMR > 30	Importantes
COMPLETAS	SMR > 30	Ninguna
	30 > SMR > 10	Posible

Finalmente, Romana presenta una recomendación de medidas de corrección de acuerdo al valor de SMR estimado, cuyo resumen se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Medidas de corrección propuestas por el SMR (Romana, 1985)

Tipo de Sostenimiento	Intervalos SMR	Medida de Corrección
Re excavación	10 – 30	Reexcavación Muros de Contención
Drenaje	10 – 40	Superficial Profundo
Hormigón	20 – 60	Hormigón Proyectado Homigón Dental

		Contrafuertes y/o vigas Muros de Pie
Refuerzo	30 – 75	Bulones Anclajes
Protección	45 – 70	Zanjas de Pie Vallas (de pie o talud) Redes y/o mallas (sobre la superficie del talud)
Sin sostenimiento	65 – 100	Saneos Ninguno

La clasificación geomecánica mediante el *Sistema Q de Barton* (1974), también tiene su corrección al uso para análisis de taludes y consiste en una expresión que relaciona el Índice de Rugosidad (J_r), el Índice de Diaclasado (J_n), el Índice de Alteración (J_a), Índice Reductor por la presencia de agua ajustado a taludes (J_{wice}) que incluye los efectos del hielo y los medios tropicales, el parámetro SRF ajustado a taludes (SRF_{slope}) y el índice de calidad de la roca (RQD). La expresión que relaciona todos estos parámetros se presenta en la ecuación 4.

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (4)$$

Además, se pueden aplicar cualquier de las siguientes dos correlaciones para relacionar el Q de Barton con el RMR de Bieniawski.

- Por Bieniawski (1976)

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (5)$$

- Por Abad y otros (1983)

$$RMR = 10,5 \ln Q + 42 \quad (6)$$

Otra opción de evaluación del macizo rocoso fracturado es la determinación del **Índice Geomecánico de Resistencia (GSI)**, el cual depende de las propiedades de los trozos de roca intacta pero también de la libertad, o contracción, que tienen estas piezas para deslizarse o rodar bajo diferentes condiciones tensionales. Este índice se basa en el criterio de rotura de Hoek y Brown (1980) y actualizado hasta su última versión de Hoek, Kaiser y Bawden (1995); Hoek y Brown (1997).

Dado que en general el criterio se considera satisfactorio, existen algunas incertidumbres e inexactitudes que ha creado inconvenientes en su implementación a modelos numéricos y a programas de computación de equilibrio límite, por lo que los métodos han sido implementados en un programa Windows llamado “Roclab” que puede ser bajado (gratis) de la página web www.rocscience.com. Y este incluye tablas y gráficos para estimar la resistencia a compresión de

los elementos de roca intacta (σ_{ci}), la constante del material m_i y el Índice de Resistencia Geológica, GSI, que permite definir con mayor precisión de los parámetros necesarios para la **modelación por equilibrio límite**.

Las **Galerías de Exploración a Cielo Abierto**, son un método directo de exploración conocido también como Calicatas es una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, de un terreno. Son excavaciones de profundidad pequeña a media, realizadas normalmente con pala retroexcavadora.

Las galerías permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar y, por lo tanto, es el método de exploración que normalmente entrega la información más confiable y completa. En suelos con grava, es el único medio de exploración que puede entregar información confiable, y es un medio muy efectivo para exploración y muestreo de suelos de fundación y materiales de construcción a un costo relativamente bajo.

Las galerías permiten:

- Una inspección visual del terreno "in situ".
- Toma de muestras para análisis de laboratorio.
- Realización de algún ensayo de campo.

La profundidad de este tipo de reconocimiento no suele pasar de los 5 metros, aunque en casos extremos puede alcanzar los 10 metros de profundidad

Los **sondeos mecánicos** para la recolección de muestras continuas, podrán realizarse mediante los métodos comunes ya conocidos de acuerdo al tipo de estrato que se esté perforando; es decir, en el caso de rocas o estratos muy duros se podrá ejecutar la **perforación por rotación** mientras que si el estrato de suelo con consistencias de blanda a firme se podrá utilizar el **ensayo SPT**.

Es importante recalcar, que aunque esta metodología busca sistematizar el análisis de taludes de macizo rocoso, la presencia de estratos de suelo en la matriz del macizo demanda ser analizada ya que dependiendo de sus características y espesor, este puede ser el factor de falla del macizo.

Ensayos de Laboratorio

En los casos en que se dé la extracción de muestras alteradas y/o inalteradas, se podrán realizar todos o algunos de los siguientes ensayos de laboratorio:

Ensayos de Identificación

Suelos

- Granulometría, (norma ASTM D422)
- Límites de Atterberg, (norma ASTM D4318)
- Clasificación AASHTO, SUCS y ASTM, (norma AASHTO M-145 y ASTM D-2487)
- Contenido de Materia Orgánica, (norma ASTM D2974)
- Gravedad Específica y Densidad Aparente. (norma STM C 127 y ASTM C29)

Rocas

- Determinación de la litología principal y contenido de minerales. (norma ASTM E965 y ASTM C311)

Ensayos Especiales

Suelos

- Ensayos de compresión triaxial (norma ASTM D4767)
- Corte Directo, (norma ASTM D 3080)
- Presión de hinchamiento nulo (cuando aplique), (norma ASTM D3877)
- Consolidación y asentamiento (cuando aplique), (norma ASTM D 2435 o D 4186)
- Densidad y Humedad Natural, (norma ASTM D4254, D-1556 y D2216)
- Proctor, (norma ASTM D698 y D1557)
- CBR, (norma ASTM D1883)
- Contenido de sulfatos y carbonatos (cualitativos), (norma ASTM D1293, ASSHTO T290 y ASTM C25)
- Ensayo de veleta en campo o similar (arcillas). (norma ASTM D 2573)

DESCRIPCION DEL METODO

El método propone una evaluación Geológico – Geotécnica compuesta por tres procesos claramente definidos:

- Estudio Geológico Básico
- Campaña de Exploración Geotécnica
- Evaluación de Estabilidad del Talud

Estudio Geológico Básico

Como primera etapa se propone un estudio geológico de los terrenos atravesados por el proyecto que permita identificar y describir las siguientes características:

- Geomorfología
- Ubicación y condiciones de afloramientos de rocas existentes
- Zonas de alineamiento y fallas locales
- Información hidrogeológica (cauces, nacientes de agua, cataratas, etc.).

Como resultado de esta primera actividad se realizará un plano geológico en planta con un ancho mínimo de 100 metros, hacia ambos lados de la línea de centro propuesta de manera preliminar. Este mapa incluirá tanto la información estratigráfica del sitio como la hidrogeológica, y será un complemento a los mapas geológicos desarrollados para el área de estudio.

Campaña de Exploración Geotécnica

Como segunda parte del proceso se realizará una campaña de exploración geotécnica que abarcara todos o algunos de los siguientes métodos de investigación:

- Ensayos de refracción sísmica.
- Levantamiento geomecánico de los macizos rocosos para la evaluación del RMR (Rock Mass Ratio de Bieniawski), del GSI (Geological Strength Index) y el Sistema Q de Barton.
- Galerías de Exploración a Cielo Abierto con toma de muestras alteradas y/o inalteradas.
- Sondeos Mecánicos con extracción continua de testigos. Mediante el sistema de rotación en el caso de estratos rocosos; o el ensayo de SPT (Ensayo de Penetración Estándar) para los estratos de suelo.

Esta segunda fase tendrá como resultado la caracterización tanto de la matriz rocosa como de los defectos del macizo rocoso de manera integral.

La investigación en esta fase debe buscar el reconocimiento del terreno de manera que se caracterice el proyecto de lo general a lo particular mediante los criterios expuestos en la siguiente tabla:

Tabla 8: Criterios de Definición del Método de Investigación y su Objetivo

Método de Investigación	Tipo de Exploración	Objetivo
Galería a Cielo Abierto	General	Reconocimiento de la naturaleza del terreno
Refracción Sísmica	Largas Extensiones	Determinar el espesor del suelo residual, el estrato de roca meteorizada y la profundidad de la roca sana

Levantamiento geomecánico de afloramientos rocosos	Puntual	Determinar el RMR, GSI y Q
Sondeos Mecánicos (rotación o SPT)	Puntual Detallada	Caracterización específica donde las exploraciones anteriores no son adecuadas o suficientes

De manera específica se definirá el tipo de exploración y frecuencia requerida, de acuerdo a la aplicación en proyecto y a un criterio de altura recomendado en la tabla 9.

Tabla 9: Tipo de exploración y frecuencia según aplicación y altura de talud

Tipo de Exploración	Aplicación	Criterio	Detalle	Frecuencia
Refracción Sísmica	Talud de Corte	$H > 10m$	Donde no se tengan cortes expuestos para observar el perfil estratigráfico	Todos
Levantamiento Geomecánico	Taludes de Corte	$H > 10m$	Donde se tengan taludes con afloramiento de roca expuesta.	Todos
Galerías a Cielo Abierto	Rellenos	$H > 5,00m$	Sobre terrenos en ladera empinada y en zonas de suelos plásticos Se recomiendan galerías de más de 1,50m debajo del nivel de fundación si son en suelo o menos si son en roca	50m
		$H < 5,00m$	Se recomiendan galerías de 1,50m por debajo del nivel de fundación si son en suelo o menos si son en roca	300m
	Taludes de Corte	$H < 8,00m$	Donde se proyecten nuevos taludes y se recomienda alcanzar toda la altura o basta que se pueda determinar el basamento rocoso	50m
Sondeos Mecánicos ⁽¹⁾	Taludes de Corte	$8,00m < H < 16,00m$	Ubicar una línea de perforación en la corona del talud	50m
		$H > 16,00m$	Ubicar una línea de perforación en la corona del talud y una adicional en la parte	50m

			media del talud	
--	--	--	-----------------	--

Nota:

⁽¹⁾ En caso de suelos firmes o muy firmes, hasta la mitad de los sondeos pueden sustituirse por exploraciones mediante galerías a cielo abierto; y en el caso de roca aflorante hasta dos tercios de los puntos pueden reconocerse mediante levantamiento geomecánico.

Evaluación de Estabilidad del Talud

A partir de la información obtenida, se efectuará la tercera etapa en la cual se realiza el análisis del talud mediante alguno de los siguientes métodos:

- SMR (Slope Mass Rating de Romana)
- Índice Q_{slope} de Barton
- Equilibrio límite por el Criterio de Rotura de Hoek y Brown

A partir de la caracterización de los taludes tanto de su matriz rocosa como de los defectos del macizo rocoso, se podrá utilizar a criterio del profesional, uno de los siguientes métodos.

Tabla 10: Criterio para Método de Análisis

Calidad del Macizo Rocosos	Método de Análisis
Muy Mala	Equilibrio Límite
Mala – Muy Buena	SMR o Q_{slope}

CONCLUSIONES

Tomando en consideración lo expuesto en el presente análisis, se llega a las siguientes conclusiones:

- En Costa Rica no existe una metodología sistemática, ni normativa específica para la regulación del análisis de estabilidad de taludes en materia de obras de infraestructura vial.
- Más del 50% del sistema vial nacional se encuentra directa o indirectamente afectado por corte o relleno de taludes.
- Son innumerables los casos en los que proyectos en operación evidencian grandes problemas de inestabilidad de taludes, que podrían haber sido evidenciados y solucionados en las etapas preliminares.
- A partir de la participación en varios análisis de estabilidad de taludes para proyectos de carreteras en el país, e investigar sobre las normativas de otros países, surge la idea de

estructurar una metodología de evaluación que comprenda tres fases básicas: Estudio Geológico Básico, Campaña de Exploración Geotécnica y Evaluación de Estabilidad del Talud.

- Se propone una metodología básica que considera criterios tanto de aplicación de métodos exploratorios (incluyendo objetivo y frecuencia) como de análisis de la estabilidad.
- Se recomienda el uso de la presente propuesta como una metodología base y que esta sea enriquecida con otras experiencias que ayuden a mejorar la calidad en nuestros procesos de análisis.
- Es indispensable que avancemos para brindar soluciones más económicas y eficientes en el largo plazo, y se reemplacen definitivamente las ideas de soluciones baratas y deficientes en el corto plazo, que se refleja en una gran parte de nuestro sistema vial nacional.

REFERENCIAS

- Salas, J. y Alpañes, J. (1975) “Geotecnia y Cimientos” Madrid, España: Editorial Rueda.
- Serrano, A. (2006) “Mecánica de las Rocas I” *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Madrid, España.
- Hoek, E., et al (2002) “El criterio de rotura de Hoek-Brown” *Consultig Engineer, University of Minnesota and Roc Science Inc*. U.S.A.
- González de Vallejo, L. I. (2002). “Ingeniería Geológica”. Prentice Hall. Madrid, España
- González de Vallejo, L. I. (1993). “Las Clasificaciones Geomecánicas de Macizos Rocosos en Ingeniería Geológica” *Curso sobre Técnicas modernas de reconocimientos geotécnicos CEDEX*. Madrid, España.
- Barton, Nick (2011). “Técnicas y experiencias más recientes en el diseño y estabilización de excavaciones en rocas para obras civiles en geologías complejas” *Curso Regional, Costa Rica*.