



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Determinación de las propiedades ingenieriles del macizo rocoso para la evaluación de diseño de taludes

Cindy Lisette Pacheco Arotinco

Golder Associates Perú S.A. ([clpacheco@golder.com.pe](mailto:clpacheco@golder.com.pe))

### RESUMEN

El presente trabajo consiste en la determinación de las propiedades ingenieriles del macizo rocoso a partir de la obtención de la resistencia de la roca intacta y de los defectos estructurales. Para la determinación de la resistencia de la roca intacta se utilizan pruebas de obtención de propiedades índice y mecánicas; mientras que para la resistencia de los defectos estructurales se emplea el criterio de rotura de Mohr-Coulumb con la finalidad de definir el ángulo de fricción ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ). Asimismo, se mencionan ciertas condiciones especiales del macizo rocoso que afectan la resistencia del mismo.

La obtención de la resistencia de la roca intacta y de los defectos estructurales es un componente importante para los análisis de estabilidad empleados en los diseños de tajos abiertos. Una inadecuada determinación de las propiedades ingenieriles, puede llevar a realizar cálculos erróneos en el factor de seguridad y en el ángulo de talud global.

### ABSTRACT

The present work consists of the determination of engineering properties of the rock mass based on the resistance of the intact rock and structural defects. The resistance of the intact rock is obtained from the index tests and mechanical properties; and for the resistance of the structural defects, the Mohr-Coulumb failure criterion is used to define the angle of friction ( $\phi$ ) and cohesion ( $c$ ). In addition, certain special conditions of the rock mass

which affect its resistance are mentioned.

The determination of the strength of intact rock and structural defects is an important component for stability analyzes used in open-pit designs. An inadequate determination of the engineering properties can lead to wrong calculations in the safety factor and in the global slope angle.

**PALABRAS CLAVE:** resistencia, macizo rocoso, roca intacta, defectos estructurales, propiedades mecánicas, propiedades índice, estabilidad del talud, ángulo de fricción,

**KEYWORD:** strength, rock mass, intact rock, structural defects, mechanical properties, index properties, slope stability, friction angle

### 1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades ingenieriles del macizo rocoso para la construcción de un talud, definen el funcionamiento probable y posterior del diseño a proponer; por ejemplo, en rocas resistentes, las estructuras probablemente serán el factor de control principal, y en rocas de menor resistencia será la resistencia del mismo quien juegue un rol importante, ya sea sola o en combinación con las estructuras.

### 2. PROPIEDADES INGENIERILES

Las propiedades ingenieriles definidas del macizo rocoso se usan para los análisis de estabilidad, los cuales se emplean para la elaboración del diseño de taludes en cada etapa del desarrollo de

un proyecto.

Según Lorig, Stacey y Read (2009), al evaluar los mecanismos potenciales de fallas de cualquier macizo rocoso deben de considerarse que en las rocas resistentes las estructuras sean el control principal, mientras que en rocas de baja resistencia esta misma sea el factor de control. Por lo cual indican que el macizo rocoso puede fallar en tres formas posibles:

- a. Fallas estructuralmente controladas, donde la ruptura ocurre solamente a lo largo de fracturas, estratificación o fallas. En este caso la resistencia y la orientación de las estructuras son los parámetros más importantes en la evaluación de estabilidad de taludes.
- b. Fallas con control estructural parcial, donde la ruptura ocurre en parte por el macizo rocoso y también en parte por las estructuras. En este caso la resistencia del macizo rocoso, y la resistencia y la orientación de las estructuras; ambas son importantes en la evaluación de estabilidad de taludes.
- c. Fallas con control estructural limitado, donde la ruptura ocurre predominantemente por el macizo rocoso. En este caso la resistencia del macizo rocoso es el parámetro más importante a considerar en la evaluación de estabilidad de taludes.

Por lo tanto, para determinar las propiedades ingenieriles del macizo rocoso, se deberá definir la resistencia del macizo rocoso; para lo cual se debe considerar la resistencia de la roca intacta y de los defectos estructurales.

## 2.1. RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA

Las propiedades que definen la resistencia de la roca intacta se miden en el laboratorio a partir de muestras representativas de la misma.

Cuando se muestrea y se ensaya la roca intacta, es importante diferenciar las pruebas para la naturaleza índice estándar y las pruebas de propiedades mecánicas ya que ambas se usan para la ingeniería de taludes rocosos.

Se pueden encontrar múltiples discusiones sobre las propiedades de las rocas y su medición

en Lama et al. (1974), Lama y Vutukuri (1974), Farmer (1983), Nagaraj (1993), Bell (2000) y Zhang (2005).

Pero para la ingeniería de taludes en tajos abiertos, según Karzulovic y Read (2009), las propiedades de la roca comúnmente usadas son las siguientes:

- a. Propiedades Índice, estas no definen el comportamiento mecánico de la roca, pero son fáciles de medir y proporcionan una descripción cualitativa de la roca; como son:
  - Índice de Resistencia a la Carga Puntual
  - Porosidad
  - Peso Específico
  - Velocidad de las Ondas P
  - Velocidad de las Ondas S
- b. Propiedades Mecánicas, estas describen cuantitativamente la resistencia y la deformabilidad de la roca; como son:
  - Resistencia a la Tracción
  - Resistencia a la Compresión Uniaxial
  - Resistencia a la Compresión Triaxial
  - Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson.

Además de las propiedades mecánicas e índice de la roca intacta, existen ciertas condiciones especiales que se deben de considerar en la roca intacta, Lorig, Stacey y Read (2009) definen los siguientes casos:

- a. Rocas de baja resistencia y suelos residuales, los taludes que contienen rocas altamente erosionadas y alteradas, rocas argílicas y suelos residuales como los saprolitos pueden fallar de una manera similar a la del suelo. En donde las decisiones de muestreo y pruebas deben determinarse en función a la naturaleza del material principal y a las condiciones climáticas en el sitio del proyecto.
- b. Rocas degradables, estas rocas adoptan ese comportamiento cuando se exponen al aire y / o al agua; son rocas ricas en arcillas y de baja resistencia como los esquistos esméticos, el relleno de fallas y algunas kimberlitas. Las pruebas estándar de degradabilidad, como la slake durabi-

lity test (SDT), pueden indicar la susceptibilidad de estos materiales a la degradación. El SDT fue diseñado por Franklin & Chandra (1972), y actualmente es el ensayo estándar de la International Society for Rock Mechanics para medir la durabilidad al desmoronamiento de las rocas de grano fino (ISRM, 1981). Esta prueba se realiza para ayudar a definir cuál va a ser el comportamiento de los futuros taludes a mediano y a largo plazo.

- c. Permafrost, la estabilidad del talud generalmente mejora cuando el macizo rocoso se congela permanentemente. Sin embargo, en condiciones de descongelación, la capa activa se debilitará. Por lo tanto, para la realización de diseño en ambientes de permafrost, es necesario determinar los parámetros de resistencia al corte (fricción y cohesión) y el contenido de humedad para las unidades de roca y suelo en los estados congelado y no congelado.

## 2.2. RESISTENCIA DE DEFECTOS ESTRUCTURALES

Los defectos estructurales son juntas, fallas, planos de estratificación, planos de esquistosidad y zonas meteorizadas o alteradas.

Para la ingeniería de taludes en tajos abiertos, el método comúnmente usado para determinación de las propiedades de los defectos es el criterio de rotura de Mohr-Coulomb en donde se definen los parámetros ángulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión (c).

Múltiples argumentos sobre la determinación y aplicación de estos parámetros en la ingeniería de taludes en tajos abiertos y en minería subterránea se pueden encontrar en Goodman (1976), Barton y Choubey (1977), Barton (1987), Bandis (1990), Wittke (1990), Bandis (1993), Priest (1993), Hoek (2002) y Wyllie y Mah (2004).

Según Stacey y Read (2009), para la determinación de la resistencia de los defectos, se deben de tener en cuenta lo siguiente:

- Medición del Esfuerzo Cortante
- Influencia del Relleno
- Efecto del Desplazamiento de las Estructuras

- Efecto de la Rugosidad de la Superficie,
- Criterio de Falla de Barton-Brandis
- Efecto de la Escala
- Esfuerzo, Deformación y Rigidez Normal
- Rigidez de Corte

## 3. APLICACIÓN DE PROPIEDADES INGENIERILES EN ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN DISEÑO DE TALUDES

Para el propósito del análisis de estabilidad del talud global se debe de considerar lo siguiente:

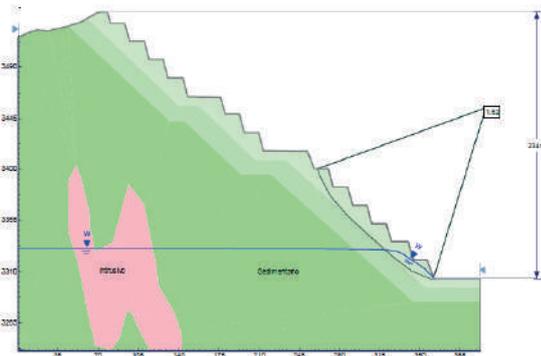
- El diseño de resistencia al corte del macizo rocoso expresado en términos de criterio de falla de Hoek-Brown Generalizado.
- La resistencia de la roca intacta y la caracterización del macizo rocoso; mediante clasificaciones geomecánicas por ejemplo las más conocidas son: Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, GSI de Hoek-Brown y el sistema Q de Barton. Existen relaciones empíricas entre las clasificaciones: Si se utiliza  $RMR_{(1979)}$  de Bieniawski, el valor de GSI es  $RMR_{(1979)} - 5$ . Si ni RMR ni GSI se pueden calcular directamente, una alternativa sugerida es la relación entre el índice de Q de Barton (Barton et al., 1974) y  $RMR_{(1976)}$  de Bieniawski (Bieniawski, 1979):  $RMR_{(1976)} = 9\ln(Q) + 44$ . Esta relación debe usarse con cautela debido a que el índice Q se usa en el diseño del túnel, no en la minería de tajo abierto.
- Para las estructuras como fallas, juntas y estratificaciones se considera el criterio Mohr-Coulomb.
- Además de ciertas asunciones que se deben de considerar tales como el nivel freático, aceleraciones inducidas por actividad sísmica, forma y altura del talud.

El punto b y c, corresponden a determinar las propiedades ingenieriles del macizo rocoso, si no se desarrollan de manera adecuada podría generar que se efectúe un mal análisis de estabilidad del talud.

Ejemplo:

Como se aprecia en la **Figura 1**, el talud está desarrollado principalmente en Sedimentario (Areniscas) y en menor proporción Intrusivo. Las propiedades mecánicas de la roca necesarias para el modelo, se asumen de las propuestas por el método RMR para un macizo de categoría III. La altura de la pared global en esta sección es de 234 m, con elevaciones de la cresta y pie de 3538 y 3304 msnm respectivamente. Además se muestra un ángulo inter-rampa (IRA) de 43°, este incluye 12.4 m de ancho de bermas. El ángulo del talud global para este perfil es 39°.

Para la sección se consideró una condición isotrópica, sin sismo y con nivel freático; obteniéndose un factor de seguridad de 1,62. Según el criterio de aceptación de Read y Stacey (2009), este factor es considerado adecuado de acuerdo a los valores mínimos establecidos.



**Figura 1. Sección Isotrópica – Estática - Fase 7**

#### 4. CONCLUSIONES

- Para la determinación de las propiedades ingenieriles se debe considerar tanto la resistencia de la roca intacta como la resistencia de los defectos estructurales.
- La adecuada determinación de las propiedades ingenieriles de un macizo rocoso genera a que se realice una buena caracterización del mismo.
- La determinación de las propiedades ingenieriles se aplica para los análisis de estabilidad en el diseño de taludes; el ángulo de la cara de un banco está controlado por las características del macizo rocoso, por ejemplo se puede generar un ángulo bajo

cuando existe una mala condición de este.

- Los macizos rocosos que particularmente presentan alteración argílica, pueden cambiar la resistencia y el comportamiento del material después de estar expuesto. Para lo cual se realizan pruebas estándar de degradabilidad, como el SDT.

#### 5. REFERENCIAS

JOHN READ AND PETER STACEY, 2009; Guidelines for Open Pit Slope Design.

RICHARD E. GOODMAN, 1989;

Introduction to Rock Mechanics

HOEK, E., 2009;

Fundamentals of slope design

HOEK, E. AND BROWN, E.T., 1980; Empirical strength criterion for rock masses.

BIENIAWSKI Z.T. 1976;

Rock mass classification in rock engineering.

EVERT HOEK, CARLOS CARRANZA-TORRES, BRENT CORKUM, 2002;

Hoek-Brown Failure Criterion

GOLDER ASSOCIATES LTD., 2007, Recommendations for Open Pit Rock

Slope Design

GOLDER ASSOCIATES PERÚ, 2012,

Feasibility Pit Slope Design – Chucapaca Project

GOLDER ASSOCIATES PERÚ, 2014,

Pre-Feasibility Geotechnical Study for Constancia Pit Expansion

GOLDER ASSOCIATES PERÚ, 2016,

Evaluación del Diseño de Taludes del Tajo Calaorco Fase 6-7