

# MODELO DE ANÁLISIS GEOTÉCNICO PARA PROYECTOS DE DISEÑO DE TALUD DE UN TAJO ABIERTO – CASO PROYECTO CHUCAPACA / HAMMOND REEF

Bayron Santos, Henry Gabulle, Giusepi Gutierrez

(bisantos@golder.com.pe) (hgabulle@golder.com.pe) (Ggutierrez@golder.com.pe)

## INTRODUCCIÓN:

En un proyecto minero de tajo abierto, el diseño de los taludes es uno de los desafíos mayores en cada etapa de planeamiento y operación. Esto requiere un conocimiento especializado de la geología, lo cual es muy complejo por proximidades de los cuerpos mineralizados donde su estructura y/o alteración pueden volverse factores claves, y de las propiedades del macizo rocoso que frecuentemente es muy variable. Adicional a esto, se requiere un entendimiento de aspectos prácticos de la implementación del diseño que le permita al ingeniero seguir una secuencia de pasos que lo lleven al logro del diseño de los taludes y el correspondiente análisis de estabilidad de estos taludes. El caso de proyecto a considerar está por definir y se plantean los siguientes casos de Chucapaca y Hammond Reef.

## RESUMEN:

El proceso del diseño del talud de un tajo abierto ha sido desarrollado durante los últimos 25 años y es relativamente estándar, aunque algunas de las metodologías varían según los ingenieros diseñadores que los efectúen. El proceso básico para diseños de taludes de un tajo abierto, sin tener en cuenta las dimensiones ni los materiales, está resumido en un diagrama de flujo (Figura 1).

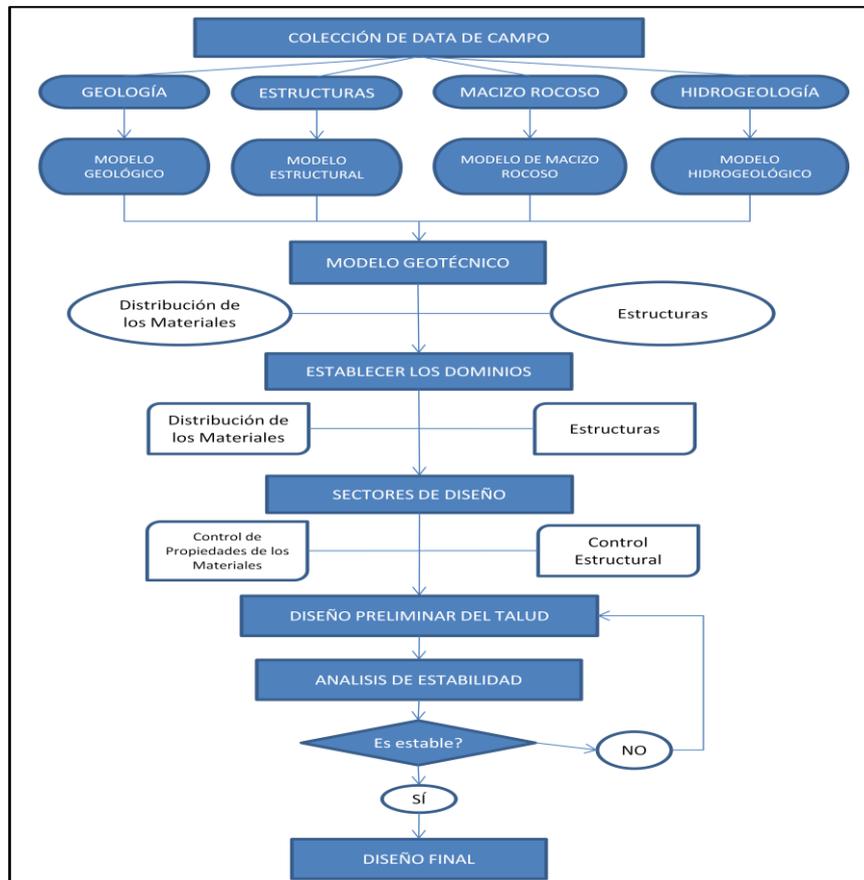


Figura 1. Diagrama de flujo de un modelo de diseño de talud de Tajo abierto.

## 1. MODELO INGENIERO-GEOLÓGICO

Es la base fundamental para cualquier estudio de diseño de taludes y está conformado por cuatro modelos componentes que son obtenidos mediante la colección de data de campo; estos modelos son:

### 1.1. MODELO GEOLÓGICO:

Muestra una distribución en 3D de los tipos de material que están involucrados en los muros del tajo.

### 1.2. MODELO ESTRUCTURAL:

Un modelo de este tipo se desarrolla a dos niveles:

- ❖ Estructuras mayores (plegamientos, inter-rampas y fallas que involucren a la mina).
- ❖ Fábrica estructural (discontinuidades, fallas menores que influyan en las bermas).

### 1.3. MODELO DE MACIZO ROCOSO (PROPIEDADES DE LOS MATERIALES):

Las propiedades de los materiales en donde se estima excavar el tajo definen el desempeño posible y el aprovechamiento del diseño.

### 1.4. MODELO HIDROGEOLÓGICO:

Tanto la presión del agua subterránea como el flujo de agua meteórica pueden traer implicancias negativas en la estabilidad de un talud, y los efectos son muy conocidos, por lo que estos son los únicos elementos que pueden ser modificados artificialmente.

Estos cuatro modelos se obtienen mediante las investigaciones de campo, que son un paso imprescindible y que influyen trascendentalmente en el diseño y posterior estabilidad del talud. Teniendo una excelente base de datos de campo se puede trabajar en el modelo geotécnico, obteniéndose mediante un mapeo de afloramientos y logueo geotécnico.

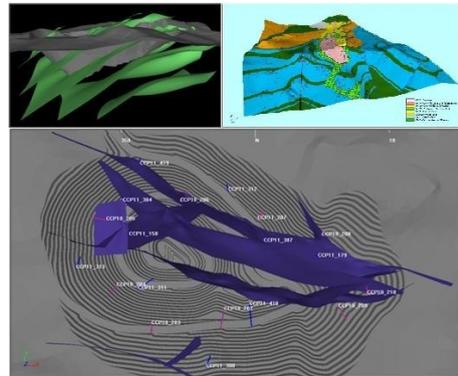


Figura 1. Modelos componentes a partir de los cuales se obtiene el modelo geotécnico.

## 2. COLECCIÓN DE DATA DE CAMPO: MAPEO DE AFLORAMIENTOS Y LOGUEO GEOTÉCNICO

### 2.1. MAPEO DE AFLORAMIENTOS (DISCONTINUIDADES, ESTRUCTURAS, ETC.)

El mapeo de afloramientos es fundamental para todas las actividades del equipo responsable de la toma de datos. Incluye un mapeo regional y a nivel de la mina. Además el mapeo depende de cada etapa de estudio, ya sea de pre-factibilidad o factibilidad, no se puede hacer un mismo mapeo para todas las fases.

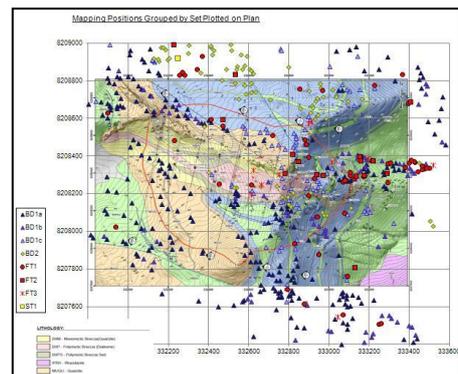


Figura 2. Mapeo de campo.

## 2.2. LOGUEO GEOTÉCNICO

Los programas de registros geotécnicos, así como los geológicos, pueden ser susceptibles a deficiencias en el control de calidad dentro de la información ingresada. Para esto, se generan formatos de registros geotécnicos (Figura 3), con los cuales los ingenieros en campo puedan coleccionar la data necesaria en un formato amigable de procesamiento.

RECORD OF ROCK CORE DRILLING AND TESTING - BOREHOLE NO. _____ Page ____ of ____																												
Project No: _____			Project Name: _____			Date Drilled & Logged: _____			Northing: _____			Reference Point: _____			Logged by: _____													
Easting: _____			Datum: _____			Drilling Contractor: _____			Elevation: _____			Azimuth: _____			Drillers: _____													
Inclination: _____			Bit Type: _____			Flush: _____			Feed: _____			Drill Rig: _____																
Diametro del testigo y revestimiento/Prof. Notas de Agua	TIPO DE ROCA	DESCRIPCION	DATOS DE RECUP DE TESTIGO				DUREZA		DATOS DE DISCONTINUIDADES																			
			Profundidad (m)	No de Corrida y Prof. (De - a) (m)	TCR (m)	RQD (m)	Fracturas por Metro	Fracturas por Corrida	Indice de Dureza	Indice de Meteorizacion	Profundidad (m)	Tipo & Numero	Orientacion			Descripcion de la Superficie				Condicion de Fractura		Relleno		LC	NOTAS / COMENTARIOS/ PROFUNDIDAD DE MARCAS/ TIPO DE RELLENO Y ESPESOR			
Prof. / Elevacion. (m)										Angulo Alfa	Angulo beta	Forma	Rugosidad	Separacion	Alteracion													

Figura 3. Formato de logueo geotécnico.

Los parámetros geotécnicos necesarios para una buena caracterización de macizo rocoso para efectos de un diseño de talud están resumidos a continuación:

- **RECUPERACIÓN (TCR):** Es la longitud total de testigo de roca recuperada en una corrida perforada.
- **RQD (ÍNDICE DE CALIDAD DE ROCA):** Representa la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigo mayores de 10 cm y la longitud total del tramo considerado.
- **NÚMERO DE FRACTURAS POR UN INTERVALO:** Las fracturas naturales son medidas por cada corrida. Cuando existen zonas con un alto grado de fracturamiento (broken core) se les asignan un valor máximo (mayoría de casos 40 fracturas).
- **NÚMERO DE SETS O FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES (JN):** Índice de diaclasado que indica el grado de fracturamiento del macizo rocoso. Nos da una idea general del tamaño de los bloques.
- **ÍNDICE DE RESISTENCIA:** Las clasificaciones de resistencia de la ISRM están basadas en simples pruebas mecánicas que pueden ser perfectamente realizadas en campo.
- **GRADO DE METEORIZACIÓN:** La meteorización es la desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos y físico-químicos, con la participación de agentes biológicos.
- **ESTRUCTURA:** Cualquier estructura geológica mayor encontrada durante la perforación. Se consideran las siguientes como estructuras mayores: Junta, venilla, falla (FLT), broken Core (BC), micro-defects zone, etc.
- **ÁNGULO ALPHA ( $\alpha$ ) O DIP ANGLE:** Es medido para cada fractura natural observada en el testigo. Este ángulo es medido con respecto al eje del testigo, donde  $0^\circ$  es paralelo al eje del testigo y  $90^\circ$  es perpendicular al eje del testigo.
- **ÁNGULO BETA ( $\beta$ ) O DIP DIRECTION ANGLE:** Es medido para cada fractura natural observada en el testigo. Este ángulo es medido horariamente desde la línea de referencia apuntando hacia abajo
- **ÁNGULO GAMMA ( $\Gamma$ ):** Es un ángulo de corrección con el cual se puede validar la data estructural (específicamente el ángulo beta) de una corrida.

## TESTIGOS ORIENTADOS: TELEVIEWER Y AC CORE TOOL:

- El Televiever óptico proporciona registros continuos de video imágenes orientadas de alta resolución de las paredes del pozo. Diferente al Televiever acústico, el Televiever óptico puede ser utilizado en aire (sobre el nivel freático) y en pozos llenos de agua.
- Reflex ACT I es un dispositivo de orientación electrónica, diseñado para garantizar orientaciones de testigos altamente precisas y consistentes en suelos fragmentados.



Figura 4. Televiever y ACT I

## 3. PROCESAMIENTO DE DATA DE CAMPO

### 3.1. GABINETE:

Una vez terminada la campaña de investigaciones se prosigue con el procesamiento de esta información obtenida. El trabajo en gabinete puede realizarse simultáneamente a la campaña de investigaciones geotécnicas y así corregir o mejorar aspectos en el camino.

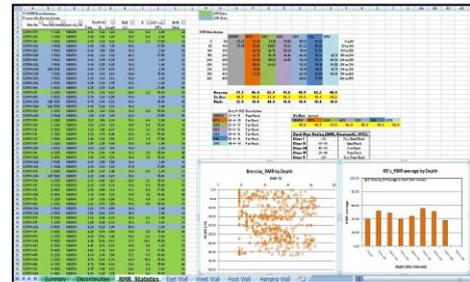


Figura 5. Gráficas obtenidas para el cálculo del RMR.

#### 3.1.1. Cálculo de Q Y RMR:

El Sistema Q para clasificación se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

**RQD** = Rock Quality Designation

**J<sub>n</sub>** = Joint Set number

**J<sub>r</sub>** = Joint Roughness number

**J<sub>a</sub>** = Joint Alteration number

**J<sub>w</sub>** = Joint Water reduction factor

**SRF** = Stress Reduction Factor

El sistema de clasificación RMR 1976 (Bienawski) es calculado de la siguiente manera:

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$$

Donde:

R1 = Resistencia de la roca intacta (rating = 0 a 15)

R2 = Índice de Calidad de Roca, RQD (rating = 3 a 20)

R3 = Espaciamiento de las juntas (rating = 5 a 30)

R4 = Condición de las juntas (rating = 0 a 25)

R5 = Agua subterránea (rating = 0 a 10)

El rating para los cinco parámetros es sumado para definir los valores de RMR que representan la condición del macizo rocoso de la zona en consideración. Cinco clases de macizo rocoso, basado en los valores del RMR, clasifican el macizo rocoso como sigue:

- ✓ Class I – *Very Good Rock* (RMR > 80);
- ✓ Class II – *Good Rock* (60 < RMR < 80);
- ✓ Class III - *Fair Rock* (40 < RMR < 60);
- ✓ Class IV – *Poor Rock* (20 < RMR < 40);
- ✓ Class V – *Very Poor Rock* (RMR < 20).

### 3.1.2. DATA ESTRUCTURAL:

El objetivo de esta etapa es estimar los mayores y menores sets de discontinuidades que son representativos en la fábrica estructural para los principales macizos rocosos de un área de investigación. La información utilizada proviene de la data de mapeo de campo, la data obtenida por el logueo geotécnico y/o mediante televiewer y la información referente a los modelos componentes del modelo geotécnico. Esta misma data se puede utilizar en el análisis cinemático.

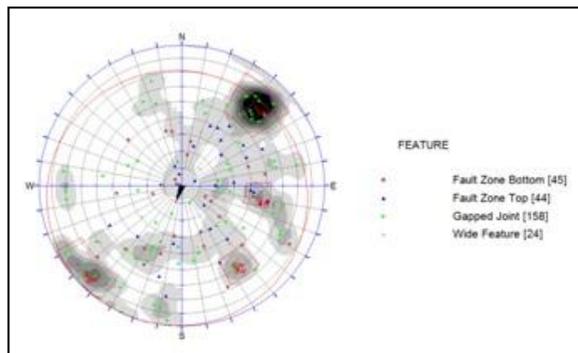


Figura 6. Stereonets obtenidas con la data estructural.

## 3.2. DISEÑO DE TALUDES

### 3.2.1. DOMINIOS ESTRUCTURALES

Los dominios estructurales pueden ser determinados de acuerdo los controles estructurales que rigen en el tajo, ya sea por la litología, la estratificación, plegamientos sistemas de fallas y la orientación de los taludes del tajo.

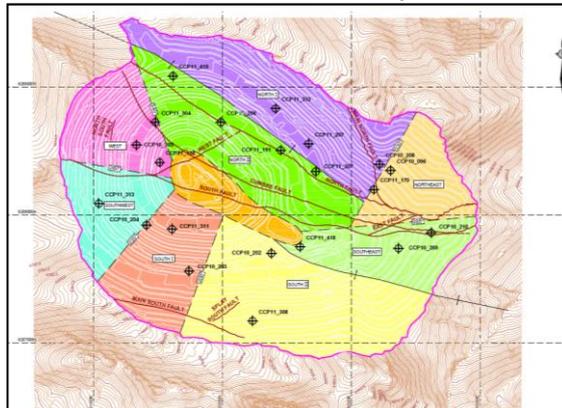


Figura 7. Ejemplo de Dominios Estructurales.

### 3.2.2. SECTORES DE DISEÑO

En general, los sectores de diseño se determinan dependiendo de los diferentes taludes del tajo si son susceptibles a control de fallas cinemáticamente.

### 3.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

#### 3.3.1. ANÁLISIS CINEMÁTICO:

Una falla de control estructural ocurre como resultado de movimientos a lo largo de discontinuidades geológicas pre-existentes. Los tres mecanismos básicos de falla estructuralmente controlada en taludes de roca son: Falla planar (planar failure), falla tipo cuña (wedge failure) y vuelco (toppling).

- a) Una **falla planar** ocurre cuando una discontinuidad geológica, como la estratificación, buza en forma paralela hacia la cara del talud y su buzamiento es mucho mayor que el ángulo de fricción.
- b) El **fallamiento en cuña** ocurre cuando un bloque de roca se desliza a través de la intersección de al menos dos discontinuidades, las cuales buzanan hacia la cara del talud den un ángulo oblicuo hacia la cara del corte, formando un bloque en forma de cuña.
- c) Un **vuelco o toppling** se puede considerar exclusivamente de medios rocosos, condicionados por la disposición estructural de los estratos hacia el interior del talud y un sistema de discontinuidades bien desarrollado.

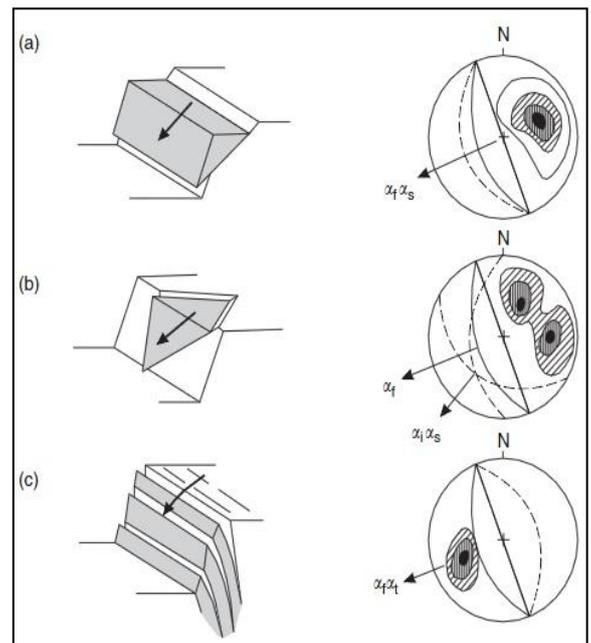


Figura 7. Principales tipos de fallamiento en taludes de roca.

### 3.3.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL

El análisis de estabilidad global se lleva a cabo en secciones seleccionadas que el ingeniero asuma sean representativas para todo el macizo rocoso. Estos análisis de mecanismos de falla circular y de falla bi-linear, se pueden determinar mediante software como Slide ® (Rocscience Ltd.).

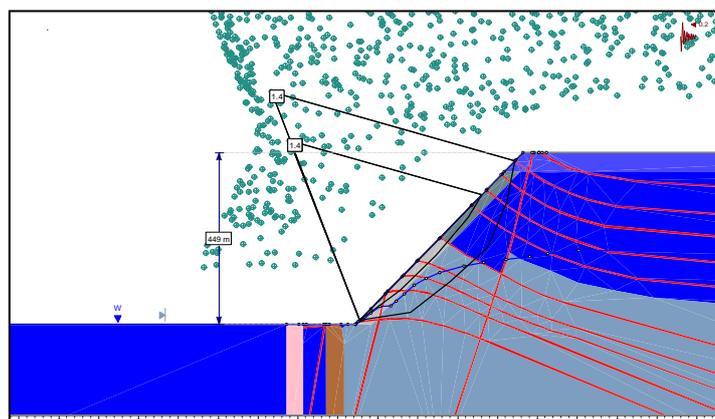


Figura 8. Ejemplo de análisis de estabilidad mediante Slide ®.

#### 4. CONCLUSIONES

- ✓ El modelo de análisis geotécnico para proyectos de un diseño de tajo abierto ha ido evolucionando con la introducción de nuevos criterios y metodologías, sin embargo, los fundamentos y principios se mantienen con el transcurso de los años.
- ✓ La colección de data geológica y estructural adquiere importancia en el diseño y estabilidad del talud.
- ✓ Las técnicas modernas de Televiewer y Reflex ACT 1 garantizan la calidad de la información estructural recolectada. Éstas son muy empleadas y extendidas a nivel mundial en el diseño de Open Pit.
- ✓ En el análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos o globales se usa metodologías conforme al avance de los niveles de estudios: Análisis Cinemático, Método de Equilibrio Libre, Modelo Numérico.

#### REFERENCIAS

- JOHN READ & PETER STACEY (2009) – Guidelines for Open Pit
- LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO (2002) – Ingeniería Geológica
- DUNCAN C. WYLLIE & CHRISTOPHER W.MAH (2004) – Rock Slope Engineering
- GOLDER ASSOCIATES PERU S.A (2011) Canahuire Pit Slope Design – Chucapaca
- GOLDER ASSOCIATES PERU S.A – Scoping Level Pit Slope Design