



## LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1	Datos de las Discontinuidades .....	4
Cuadro 3.2	Parámetros de Resistencia del Macizo Rocos para el Diseño.....	6
Cuadro 3.3	Resistencia del Macizo Rocos .....	6
Cuadro 3.4	Resistencia y parámetros de las Discontinuidades.....	7
Cuadro 4.1	Posibles Modos de Falla .....	8

## **1. INTRODUCCIÓN**

Este memorando constituye un informe preliminar respecto al diseño de los taludes Tajo Abierto TG-1 de Tambogrande, desde el punto de vista de mecánica de rocas.

La intención es que este breve informe provea una estimado a nivel de factibilidad, del ángulo que deberán tener los taludes del tajo.

Existe una amplia base de datos para esta evaluación. El análisis preliminar se ha hecho sobre la base de la siguiente información:

- Los registros geotécnicos de los taladros inclinados orientados GTCH 2, 4, 5, 6 y 7;
- Taladros verticales de exploración geológica perforados a lo largo de las Secciones A, B, C y D (ver Figura 1). Se seleccionaron estas secciones para representar las paredes norte, oeste, este y sur respectivamente;
- Interpretación de la ubicación de la base de la zona de sulfuros, a partir de los registros de geológicos de todas las perforaciones.

## **2. GEOLOGÍA**

### **2.1 Escenario Tectónico**

El ambiente tectónico del tajo TG-1 ha sido interpretado sobre la base de la información geológica de la que se dispone del depósito mineral de Tambogrande.

El cuerpo mineralizado de sulfuros parece ser una acumulación formada en un ambiente tectónico extensional, en una cuenca subsidente. Las fallas regionales de tracción, con dirección precisamente al oeste y norte formaron grabens escalonados en la cuenca subsidente. Una serie compleja de flujos piroclásticos, de detritos, brechas y conglomerados llenaron la cuenca formando las rocas de la caja piso y los cuerpos mineralizados laterales. Un concepto interesante son las grandes cantidades de anhídrita, que pueden haberse formado en la caja piso y en los cuerpos mineralizados laterales. Se

creo que esta anhidrita fue disuelta durante inundaciones posteriores de la cuenca, lo cual contribuyó al colapso regional y al brechamiento de los yacimientos.

Se cree que la zona de sulfuros en TG-1 se formó tardíamente en el desarrollo de la cuenca y en algunos lugares está inter-estratificada (sub-horizontalmente) con flujos de lava. Puede que la zona de sulfuros haya sido formada desde una chimenea central y discurrido sobre un lecho oceánico no fracturado.

Depositado sobre los sulfuros y los volcánicos encajonantes existe una zona de arenisca oxidada, rocas volcano-clásticas y lavas. Esta zona de óxidos es continua y se extiende más allá de los bordes del cuerpo mineralizado de sulfuros, lo cual sugiere que es más reciente que los demás depósitos y no el producto de la intemperización.

El contacto con el sulfuro es nítido y es sub-horizontal en las secciones transversales que se estudiaron para este informe. Las perforaciones sugieren que con frecuencia se presenta en la base de la capa de óxidos una zona de flujo de escombros de torrente rica en arcilla y brechada de arenisca.

Las perforaciones estudiadas hasta la fecha no han registrado la presencia de rocas no competentes de la Formación Tambo Grande en las paredes proyectadas del tajo.

## **2.2 Alteración**

Los productos de alteración incluyen clorita y sericita.

## **2.3 Intrusiones (Diques, Sills y cuerpos intrusivos)**

No es común la presencia de rocas intrusivas, aunque normalmente se observan varios diques delgados (<10 m de potencia) en la mayoría de las perforaciones.

Se cree que las intrusiones se han dado preferentemente a lo largo de juntas y fallas preexistentes. Existen intrusiones que cruzan los márgenes del cuerpo mineralizado, posteriores a la formación de los sulfuros.

## **2.4 Fallas**

Al igual que con las intrusiones, normalmente se registran varias fallas en cada perforación. Es probable que estas fallas sean sub-verticales, y se cree que sean sub-paralelas a las paredes del graben.

## **3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

### **3.1 Perforación Orientada de Testigos**

Se cuenta con registros geotécnicos de cinco taladros ejecutados mediante técnicas de perforaciones orientadas usando el método de orientación ballmark. Se realizaron comprobaciones puntuales del buzamiento y de la dirección del buzamiento del taladro, usando el método Sperry Sun después de la perforación.

En total se tomaron 1319 medidas completas en diaclasas, vetas, zonas de corte y otras discontinuidades. Estos datos se convirtieron en buzamiento y dirección del buzamiento usando el programa “Dips” y fueron luego representados en proyecciones estereográficas en igual área en el de hemisferio inferior. Los datos se separaron luego en dominios estructurales, a fin de evaluar si habían sub-conjuntos de los registros tomados, para lo cual se prepararon proyecciones estereográficas independientes de:

- Cada perforación;
- Juntas, vetas, fallas, o diques para cada perforación y todas las perforaciones en conjunto;
- Zona de óxidos, zona de sulfuros, caja piso, o roca encajonante, para cada perforación y para todas las perforaciones en conjunto; e

- Intervalos de profundidad 0-50 m, 50 m-100 m, 100 m-150 m, 150 m-200 m para cada perforación y para todas las perforaciones.

Los resultados de este análisis señalaron que:

- El número de juntas mapeadas era insuficiente en la zona no competente de óxidos como para poder evaluar un patrón;
- En las demás rocas, habían tres conjuntos principales de diaclasas que se consignan en el Cuadro 3.1; y
- Existirían dos orientaciones de falla y una orientación de dique, tal como se muestra el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1 Datos de las Discontinuidades**

TIPO DE DISCONTINUIDAD	DENOMINACIÓN	PARÁMETROS DE DISEÑO		DISPERSIÓN	
		BUZAMIENTO O Grados	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO Azimut	BUZAMIENTO O Grados	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO Azimut
Diaclasa	J1	42	292	23-66	246-335
Diaclasa	J2	51	067	43-59	052-090
Diaclasa	J3	61	130	58-83	121-160
Falla y dique	F1, D1	64	060	No se calculó	No se calculó
Falla	F2	50	012	No se calculó	No se calculó

De lo anterior se desprende que las mayores concentraciones de polos se presentan en J1. La diaclasa J2 no está tan desarrollada, y la diaclasa J3 es más débil aún. Las fallas y diques muestran también una fuerte concentración, aunque se registró un menor número de polos. No parece haber una variación importante en el buzamiento o en la dirección de buzamiento, con relación al tipo de roca o a la profundidad.

Los registros de fracturas fueron medidos en las perforaciones verticales de exploración y mostraron buzamientos para las concentraciones de fracturas de entre 45° y 60°, lo cual concuerda con los resultados obtenidos de los testigos orientados.

Además, una primera evaluación preliminar de las curvas de nivel de la base de la zona de sulfuros muestra que los buzamientos más fuertes serían de alrededor de 60°, lo cual concuerda con los registros obtenidos de los testigos orientados.

### **3.2 Resistencia del Macizo Rocoso**

Se ha estimado la resistencia del macizo rocoso usando el sistema GSI de calificación (Hoek et al., 1995), sobre la base a los siguientes datos para cada tipo de roca.

- i) Índice de calidad de roca (RQD);
- ii) Frecuencia de fracturas;
- iii) Resistencia a la compresión uniaxial (UCS);
- iv) Grado de intemperización de las discontinuidades; y
- v) Constante para el Macizo Rocoso (Mi).

Los valores i) al iv) se derivan directamente de las hojas de los registros geológicos, mientras que la constante para el macizo rocoso se obtuvo de la descripción geológica, sobre la base de valores que aparecen en las publicaciones (Hoek et al., 1995).

En el Cuadro 3.2 se consignan los parámetros seleccionados.

**Cuadro 3.2 Parámetros de Resistencia del Macizo Rocos para el Diseño**

TIPO DE ROCA	UCS (MPa)	RQD %	ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES (mm)	CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES (Códigos) <sup>(1)</sup>	CONSTANTE Mi
Óxidos	15	25	50	3	13
Volcánicos	50	50	150	3	17
Sulfuro Masivo	50	50	100	3	17

(1) Superficies algo rugosas, contacto suave entre las paredes de las diaclasas.

Sobre la base de dichos parámetros, se estimaron las siguientes resistencias promedio del macizo rocoso.

**Cuadro 3.3 Resistencia del Macizo Rocos**

TIPO DE ROCA	COHESIÓN kPa	ÁNGULO DE FRICCIÓN Grados	CLASIFICACIÓN GSI
Óxidos	350	39	44
Volcánicos	840	50	54
Sulfuro masivo	800	50	53

### 3.3 Discontinuidades

La estabilidad de los taludes en roca está normalmente controlada por la resistencia que existe a lo largo de la superficie de las discontinuidades, sobre todo cuando éstas pueden desarrollar cuñas u otras superficies de deslizamiento.

La resistencia a lo largo de las discontinuidades se estimó sobre la base de métodos propuestos por Barton et al ( en Hoek, 1995).

La resistencia de una discontinuidad se estima sobre la base de la condicion del parámetro JRC , de la rugosidad de la diaclasa y de la dureza de la pared de la diaclasa JCS. El parámetro JRC se obtiene de los registros geológicos para forma y rugosidad. El



parámetro JCS se considera como el 25% del UCS (Franklin, 1989). Por último, se requiere un valor de  $\phi$  básico. Este valor depende del tipo de roca y de los productos de alteración que se forman a lo largo de la diaclasa. El valor de  $\phi$  básico se seleccionó sobre la base de lo sugerido por Lama y Vutukuri (1978).

En el Cuadro 3.4 se indican los valores considerados para cada uno de los parámetros antes mencionados. El Cuadro 3.4 también muestra las resistencias instantáneas a lo largo de las discontinuidades para tensiones de confinamiento medias (800 kPa).

**Cuadro 3.4 Resistencia y parámetros de las Discontinuidades**

TIPO	JRC	JCS (MPa)	$\phi$ básico	RESISTENCIA A LA TENSIÓN EFECTIVA *	
				C kPa	$\phi$ Grados
Óxidos	14	4	22	100	25
Sulfuro Masivo	10	13	33	120	40
Volcánicos	10	13	33	120	40
Fallas	7	0.25	18	45	11

\* no corregido por efecto de escala de campo.

## 4. ANÁLISIS

### 4.1 Fallas de Cuña y Planares cinemáticamente admisibles

Usando la orientación promedio de las discontinuidades y la orientación supuesta de las paredes de talud del tajo, se evaluaron todas las combinaciones de diaclasas y fallas usando el programa SWEDGE para identificar posibles mecanismos de falla que pudieran darse geoméricamente (es decir, que serían cinemáticamente admisibles).

El Cuadro 4.1 muestra un resumen de posibles modos de falla admisibles.

**Cuadro 4.1 Posibles Modos de Falla**

PARED DEL TAJO	CUÑA CRÍTICA	PLANO CRÍTICO	COMENTARIOS
Norte	Ninguno	Ninguno	Posibles cuñas muy echadas en J1/J3.
Este	Ninguno	Ninguno	Posibles cuñas muy echadas en J1/J3. J1 buzará fuera del talud, si el rumbo de la pared Este fuera de alrededor de N020E.
Sur	J1/F1 J1/F2	F2	Echado. Probablemente esté bien. Inclinación hacia el talud probablemente bien. Aflora si el talud es >50°.
Oeste	J2/J3 J2/F2 J3/F3	J2 y F1	Se forma cuña con el plunge de intersección 077/51°. Se pierde el contacto en ambas caras si el talud >45°. Se forma cuña con el plunge de intersección 064/36°. Posibles fallas planares.

## 4.2 Análisis de estabilidad

Se llevó a cabo un análisis de estabilidad de los taludes del tajo usando el modelo CLARA y las resistencias de macizo rocoso del Cuadro 3.3 con  $r_u=0.3$  (que corresponde a aproximadamente un 50% de saturación para el talud). El factor de seguridad de un talud de 45 grados que falla a través de la masa rocosa es de aproximadamente 2.0. Si la cohesión en el sulfuro masivo y los volcánicos se reduce en 50%, el factor de seguridad se reduce a 1.3. Para el diseño de las paredes de tajos abiertos, se considera normalmente un factor de seguridad de 1.3.

También se evaluó la estabilidad del talud con una discontinuidad buzando fuera del talud a 30 grados, con un ángulo de fricción de 18 grados, que corresponde a la probable orientación más desfavorable. El factor de seguridad de dicho talud con una inclinación de 45 grados, con  $r_u=0.3$  sería de 0.7. No se ha identificado hasta la fecha una discontinuidad con buzamiento de 30 grados que aflore en alguna de las paredes del tajo,

pero el análisis realizado destaca la sensibilidad de la estabilidad de los taludes a la presencia de discontinuidades que pudieran aflorar.

## 5. **ÁNGULOS DE TALUD RECOMENDADOS PARA LAS PAREDES DEL TAJO**

Sobre la base del análisis anterior, parecería que en general, el ángulo de los taludes estará controlado por la presencia de discontinuidades, antes que por la resistencia del macizo rocoso. La mayoría de las discontinuidades no aflorarán si las paredes se mantienen con una inclinación de los taludes de 45°.

Por lo tanto y para efectos del estudio a nivel de factibilidad, se recomienda que se adopten los siguientes taludes:

Zona de Óxidos	40°
Volcánicos/ Sulfuros Masivos	45° en las paredes Sur y Oeste
	45° - 50° en la pared Este
	50° en la pared Norte

El establecer las paredes Sur y Oeste en 45°, por debajo de la zona de óxidos, reduce la probabilidad de fallas planares o de cuña. Los datos disponibles señalan que no se encuentran rocas de la formación Tambogrande en el extremo Sur del tajo propuesto, aunque la geología regional sugiere que dichas rocas podrían estar presentes en esa área. Sin embargo, si se hallaran estas rocas más débiles, podría ser necesario que los taludes tengan una menor inclinación.

La pared Este del tajo podría llegar a tener hasta 50°, ya que parece que las características estructurales en esa zona no tienen un mayor impacto. Sin embargo, si la pared final se aproximara a la orientación de la Junta 1, la pared Este podría experimentar problemas si

tuviera una inclinación de más de  $42^\circ$ , por lo que se recomienda tratar de ubicar la pared del tajo en esa zona lo más lejos posible de una orientación  $N020^\circ E$ .

Parece que la pared Norte sería la más estable de las cuatro y es probable que su estabilidad esté controlada por la resistencia de macizo rocoso.

Se supone que se proveerá a las paredes del tajo de un adecuado sistema de drenaje, probablemente en la forma de drenes horizontales. Será necesario hacer voladura controlada, a fin de evitar la fractura de la roca en las paredes por efecto de los disparos con explosivos. Toda la roca se encuentra bastante fracturada y a menos que se adopte un sistema de voladura controlada, podrían presentarse fallas extensas en las paredes.

Los taludes mencionados son sólo estimados preliminares y pueden ser modificados durante el trabajo de diseño que habrá que hacer posteriormente y por medio de excavaciones de prueba durante las primeras etapas del minado. Las perforaciones actuales proveen una excelente base de datos para el diseño que habrá que hacer posteriormente de los taludes del tajo.