

## 6. DISCUSION

### 6.1 Introducción

En este capítulo se hace referencia al significado de los resultados que se obtuvieron, haciendo énfasis a la aportación de la investigación realizada. Se presenta una discusión por cada capítulo y al final se expone ésta en forma general de acuerdo al procedimiento empleado.

### 6.2 Análisis Cinemático

Al realizarse el análisis cinemático a cada talud, se comprobó la eficiencia y simplicidad sugerida por Markland (1972) para la identificación del mecanismo potencial de falla. Un aspecto importante a considerar es el inventario de los datos estructurales, los cuales deben de cumplir los siguientes aspectos: en primer orden el número de datos levantados, los cuales deben ser representativos del macizo rocoso debido a que las fracturas muestran una heterogeneidad en cuanto a las orientaciones que presentan, por lo cual al momento de hacer el conteo estadístico, la concentración máxima debe mostrar el patrón representativo a dichas discontinuidades; otro factor importante es la identificación del tipo de fractura al momento de hacer el inventario estructural, esto es, reconocer en campo el origen de ésta ya que por lo regular cuando se tienen cortes realizados artificialmente, es fácil de confundir las diaclasas tectónicas con fracturamiento producido por los mismos métodos de excavación, como por ejemplo el uso de voladuras ó excavación mecánica.

Otro aspecto muy importante a considerar es la comparación del mecanismo de falla obtenido por el análisis estereográfico, con el mecanismo observado en campo. Ejemplo claro de esto fue el análisis hecho al Talud #2, donde inicialmente el mecanismo observado en campo fue el de vuelco de bloques, pero al vaciar los datos en la estereofalsilla se demostró que se tiene un deslizamiento planar contrario a lo anterior como mecanismo dominante. El Markland's Test demostró también en el Talud #1, que el deslizamiento de la cuña ocurre a través del plano J2 y no por la línea de intersección.

Para realizar cualquier proyecto de ingeniería en el cual intervengan cortes en el macizo rocoso, se debe de contemplar las condiciones geológicas presentes. Esto conlleva a hacer primeramente una cartografía geológica estructural del área, para reconocer los diferentes tipos de roca en los cuales se realizarán los cortes, además de reconocer la ó las estructuras principales donde

se vaya a ubicar la obra y determinar el tipo de fracturamiento que en cierta forma servirá para predecir los posibles mecanismos de inestabilidad. En este trabajo de tesis se encontró una relación geométrica entre el fracturamiento presente en cada uno de los taludes con la cinemática para evaluar las condiciones anteriormente descritas, que sirvió como punto de partida para el análisis de estabilidad.

La metodología empleada demuestra tener ciertas limitantes ya que no considera presiones intersticiales de agua ni cohesión entre los planos, lo cual conlleva a decir que la resolución de la estabilidad es mediante relaciones geométricas, así como también de orientación de las discontinuidades en forma desfavorable al talud. En base a este postulado afirmamos que se debe considerar esta técnica para identificar el mecanismo potencial de falla, para posteriormente realizar un análisis de estabilidad considerando los factores antes descritos en el capítulo anterior.

### 6.3 Caracterización Geomecánica

En este capítulo se buscó la forma de estimar la resistencia al corte del macizo, para determinar las fuerzas que se oponen al deslizamiento de los bloques. La búsqueda de datos cuantitativos llevó a aplicar las tres principales técnicas: ensayos directos en roca mediante pruebas triaxiales, aplicación del criterio empírico de Barton y Choubey (1977), además de la metodología que se enfoca a la observación y descripción de las propiedades de las discontinuidades presentes en el macizo mediante el Rock Mass Rating de Bieniawski (1976) y la interacción de estos resultados con la orientación de las discontinuidades según el Slope Mass Rating de Romana (1985).

Talud	Ensayo Triaxial		Criterio Barton y Choubey		Rock Mass Rating		Slope Mass Rating	
	c	$\phi$	C	$\phi$	c	$\phi$	Descripción	Tratamiento
Talud #1	94.292	32.023°	37.88	31°	300-400	35-45°	Estable	Ocasional
Talud #2	108.936	39.355°	39.60	35°	300-400	35-45°	Parcialmente	Sistemático
Talud #3	108.936	39.355°	39.60	35°	300-400	35-45°	Estable	Ocasional
Talud #4	108.779	39.276°	30.70	35°	300-400	35-45°	Parcialmente	Sistemático
Talud #5	90.361	30.058°	2.17	31°	300-400	35-45°	Inestable	Corrección
Talud #6	90.361	30.058°	2.17	31°	300-400	35-45°	Parcialmente	Sistemático

**Tabla 6.1.** Valores obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas para caracterización geomecánica de cada talud (valores de cohesión en KPa).

Los resultados obtenidos de las tres presentan discrepancia en cuanto a resultados (Tabla 6.1). Primeramente la clasificación geomecánica RMR está directamente relacionada a las

observaciones en campo y los datos que resultan de ella presentan un margen demasiado amplio. En comparación con los ángulos de fricción  $\phi$  obtenidos por el Criterio de Barton y Choubey (1977), estos quedan dentro del margen del RMR, salvo los taludes #5 y #6 donde se tiene otra litología distinta. Los valores de la cohesión difieren entre ambos métodos, en RMR se observan valores altos porque se aplica de manera generalizada y en el criterio se puede decir que se hace un ensayo de corte a esfuerzo bajo, por lo cual este valor es más preciso que el anterior. Algo que es muy notable es el aumento del ángulo de fricción respecto a la rugosidad de J1 (estratificación) en el Talud #1, ya que presenta juntas estilolíticas, comprobándose así la eficiencia del criterio.

El ensayo triaxial a muestras de roca intacta, proporciona datos certeros de las propiedades de la roca intacta, sin considerar las discontinuidades. Sin embargo es un método muy completo del cual se puede derivar la estimación de otros parámetros geomecánicos como cohesión, ángulo de rozamiento interno, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción y tensión. Estas referencias fueron empleadas al momento de la elaboración de la Carta de Zonas Homogéneas. En razón de que la estabilidad de los taludes estudiados está gobernada por el fracturamiento presente, la implementación del Criterio de Barton y Choubey (1977) que analiza la resistencia al corte directamente en las juntas, permite la determinación de la cohesión y ángulos de fricción para el análisis de estabilidad.

#### 6.4 Análisis de Estabilidad

Con la identificación del mecanismo de falla mediante el análisis cinemático y la estimación de la cohesión y ángulos de fricción de las discontinuidades, se procedió a realizar la resolución de fuerzas actuantes en los taludes, para identificar su probabilidad de falla calculando factores de seguridad. La metodología empleada se basó en las propuestas de Hoek y Bray (1981) para análisis de cuñas y el Cono de Fricción de John (1968) para deslizamiento planar.

Los factores de seguridad para cuñas se obtuvieron bajo tres condiciones diferentes: 1) talud con saturación de agua y cohesión entre planos, 2) talud en seco y sin cohesión, detenido sólo por fricción entre planos y, 3) talud saturado sin cohesión. El primero refleja las características presentes del talud en situaciones normales, el segundo caso muestra sólo el factor de seguridad analizando condiciones geométricas y de orientaciones desfavorables de las discontinuidades respecto al talud, mientras que el tercero representa al talud en las peores condiciones posibles: saturación completa de agua y sin cohesión entre planos. Para el mecanismo planar se analizó la estabilidad con: 1)

condición seca considerando sólo el ángulo de fricción, y 2) considerando sólo la cohesión entre planos.

Talud	Mecanismo	FS cohesión y agua	FS sólo saturación	FS sólo fricción	FS sólo cohesión
Talud #1	Cuñas	1.65	0.0	0.26	-----
Talud #2	Planar	-----	-----	1.50	1.50
Talud #3	Cuñas	5.10	1.44	4.60	-----
Talud #4	Cuñas	0.17	0.0	0.23	-----
Talud #5	Planar	-----	-----	0.58	0.59
Talud #6	Planar	-----	-----	1.17	1.24

Tabla 6.2 Valores obtenidos del Factor de Seguridad en condiciones diferentes para cada talud.

Los valores de FS en los taludes para mecanismo de cuñas (Tabla 6.2), reflejan la disminución de las fuerzas que resisten en condiciones extremas de precipitación. Para el Talud #4 se conserva el Factor de Seguridad en dichas condiciones debido a que el ángulo de inmersión de la línea de intersección es bajo ( $\phi = 13^\circ$ ). En los taludes con mecanismo planar, los factores calculados en ambas condiciones muestran poca diferencia. No se calcularon con saturación de agua por la falta de instrumentación necesaria para cuantificarla. A pesar de que algunos valores son mayores a 1.0, no se puede descartar la posibilidad de falla de los taludes porque el margen entre 1.0 y los resultados es pequeño. De acuerdo al índice de precipitación que se tiene en esta zona que es de 1429 mm/año, se puede considerar que están sometidos a condiciones extremas, lo que lleva a tomar la determinación de que algunas condiciones presentes se tienen que modificar para obtener un grado de seguridad de estos cortes. En este mismo capítulo se determinaron para factor de seguridad en condiciones de saturación un valor de 0.0 para los Taludes #1 y #4, ya que representan valores menores a este número

En la literatura consultada (Hoek y Bray, 1981; Kliche, 2000) se menciona que la falla de los taludes no necesariamente tiene que originarse de manera espontánea. Normalmente los rellenos de las fracturas van siendo erosionados con el paso del tiempo hasta que las condiciones de cohesión y fricción son vencidas por el peso mismo de los bloques de roca y la presión intersticial existente entre ellas. Cabe señalar que los factores de seguridad obtenidos en si son bajos y no por ello significa que los taludes debieron estar ya fallados al momento de hacer su reconocimiento. Es por eso que las medidas de remediación recomendadas en el capítulo siguiente, se toman como manera provisoria de controlar la falla y no estabilizar en si las condiciones presentes, ya que estas no se

pueden modificar por las condiciones actuales de funcionamiento, pero una supervisión óptima de mantenimiento permite controlar los desprendimientos hasta que el talud encuentre por si solo su equilibrio natural.

Gili (1990), recomienda que los taludes donde la estabilidad de estos dependa sobre vidas humanas, el rango del Factor de Seguridad debe de encontrarse entre 1.7 – 1.8 en condiciones de saturación de agua, de lo cual podemos afirmar que ninguno de los taludes estudiados se encuentra dentro de este rango de seguridad, para lo cual obras de saneamiento deben ser implementados.