

4. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

4.1 Introducción

En la evaluación de la estabilidad de un talud como excavación en roca, es importante determinar algunas de las propiedades ingenieriles. Estas propiedades consisten en: 1) las propiedades físicas y mecánicas de los bloques de roca intacta y 2) las propiedades de las discontinuidades que limitan los bloques individuales. Las excavaciones en el macizo rocoso son afectadas por la resistencia al corte de las discontinuidades dentro del mismo. Si la roca presenta orientación desfavorable por parte de las discontinuidades, su resistencia para propósitos de diseño puede ser notablemente reducida, ya que éstas pueden interceptarse y formar cuñas potencialmente inestables, ó bien pueden orientarse e inclinarse formando planos de deslizamiento como se describió en el capítulo anterior. El comportamiento del macizo rocoso es también influenciado por condiciones de las juntas como la rugosidad de las superficies, alteraciones y/o material de relleno si está presente. La resistencia del macizo en su totalidad (los bloques de roca intacta más las discontinuidades que los limitan) debe ser considerada en el diseño de estructuras, como excavaciones subterráneas ó cortes de talud. (Goodman, 1976). Por lo cual la **Caracterización Geomecánica** incluye a los procedimientos y técnicas para evaluar la resistencia de un material bajo condiciones de esfuerzo que pudiesen provocar inestabilidad en un macizo rocoso. Principalmente se tienen dos tipos de investigación: el primero fundamentado en el reconocimiento a detalle “in situ” que describe las características físicas de la roca, y el otro mediante ensayos de laboratorio para muestras tomadas directamente del macizo.

4.1.2 Resistencia al Corte del Macizo Rcoso (*Criterio de Mohr – Coulomb*)

En el análisis de estabilidad de un talud, el factor más importante a considerar es la geometría de los bloques de roca formados por patrones de discontinuidades. Como se discutió en el capítulo anterior acerca de las relaciones geométricas entre la orientación de las discontinuidades y el talud, se determinó que algunas partes del macizo rocoso son potencialmente viables para el deslizamiento de los bloques. El siguiente factor importante a considerar es la *resistencia al corte* de la superficie potencial de deslizamiento, la cual puede consistir de un simple plano de discontinuidad ó un complejo sistema de fracturamiento. La determinación de un valor de la resistencia al corte confiable es crítico, porque pequeños cambios en el valor definen la

potencialidad de falla del talud modificando características como la orientación, pendiente ó altura. La elección del valor apropiado no solo depende de la disponibilidad de los datos, sino también de la interpretación de estos (Hoek y Bray, 1981).

Si se tienen dos bloques de roca que han sido obtenidos de la misma masa rocosa (Fig. 4.1), los cuales contienen un plano de discontinuidad común entre ellos como por ejemplo un plano de estratificación, este plano contiene un relleno que en otras palabras, se necesitaría de aplicar una fuerza de tensión para poder separar los bloques. La superficie es absolutamente planar y no contiene ondulaciones o rugosidades. Este espécimen es sujeto a un esfuerzo normal σ , aplicado a través de la superficie y el esfuerzo cortante τ requerido para causar el desplazamiento u , que es medido. Graficando el nivel de esfuerzo cortante resulta un tipo de curva mostrado en la Fig. 4.2 con desplazamientos muy cortos, el espécimen se comporta elásticamente y el esfuerzo cortante se incrementa con el desplazamiento. Como la fuerza que se resiste al movimiento es vencida, la curva tiene un comportamiento no lineal y alcanza un pico que indica el valor máximo alcanzado por el esfuerzo cortante. De aquí en adelante el esfuerzo cortante requerido para causar el nuevo desplazamiento por corte, cae rápidamente y los niveles muestran un valor constante llamado resistencia al corte residual.

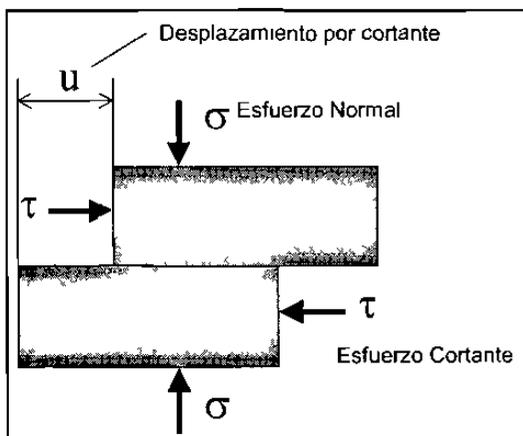


Fig. 4.1 Representación de los esfuerzos cortante y normal en una discontinuidad formada por dos bloques de roca (modificado de Hoek y Bray, 1981).

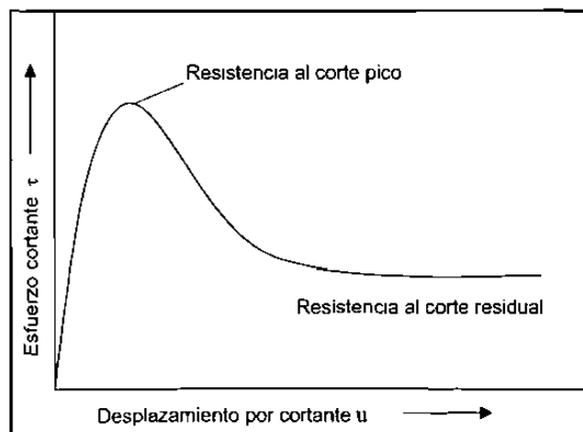


Fig. 4.2 Gráfica del desplazamiento por corte u versus el esfuerzo cortante τ (modificado de Hoek y Bray, 1981).

Si el valor pico de la resistencia al corte obtenido desde ensayos, es graficado con niveles de esfuerzo normal, se dibujará una gráfica como la que se muestra en la Fig.4.3 Esta gráfica denominada *Envolvente de Mohr*, será aproximadamente lineal, dentro de la precisión de resultados

experimentales, con una pendiente igual al ángulo de fricción pico ϕ_p y la intersección del eje del esfuerzo cortante c_p que significa la resistencia cohesiva del material de relleno de la discontinuidad. Este componente cohesivo del esfuerzo cortante total es independiente del esfuerzo normal pero el componente friccional se incrementa con el aumento del esfuerzo normal. El pico de la resistencia al corte es definido por la siguiente ecuación, la cual se conoce como el *Criterio de Mohr – Coulomb*:

$$\tau = c_p + \sigma \tan \phi_p \quad (4a)$$

graficando la resistencia al corte residual contra el esfuerzo normal, se obtiene una relación linear definida por la ecuación:

$$\tau = \sigma \tan \phi_r$$

mostrando que la resistencia cohesiva del material de relleno se ha perdido. El ángulo de fricción residual ϕ_r es usualmente menor que el ángulo de fricción pico ϕ_p (Fig. 4.4).

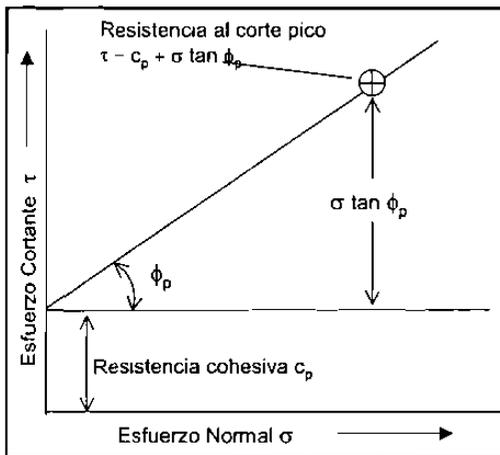


Fig. 4.3. Gráfica del esfuerzo cortante versus esfuerzo normal (modificado de Hoek y Bray, 1981).

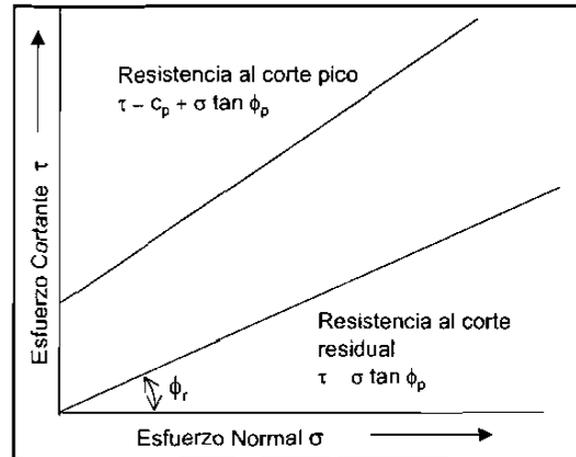


Fig. 4.4. Diferencias entre las envolventes de la resistencia al corte pico y residual (modificado de Hoek y Bray, 1981).

4.2. Ensayo Triaxial de la Roca

La envolvente de una serie de círculos Mohr representa condiciones de esfuerzo a la falla de un material dado. De acuerdo a la hipótesis de ruptura de Mohr, una envolvente de ruptura es el grupo de puntos en los cuales las coordenadas representan las combinaciones de los esfuerzos normal y cortante que pueden causar la ruptura del material. La hipótesis de Mohr se basa en que cuando la falla por cortante toma lugar a través de un plano, el esfuerzo normal σ y el esfuerzo cortante τ a través del plano son relacionados por las características funcionales del material (Jaeger y Cook, 1979), es decir, $|\tau| = f(\sigma)$. La relación funcional es representada en la envolvente de Mohr. Si se tienen los tres esfuerzos principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) y $\sigma_2 = \sigma_3$, en este caso hablando de pruebas

triaxiales a un espécimen cilíndrico, los valores de τ y σ pueden ser encontrados por la envolvente. La falla no ocurrirá si los valores de τ y σ son menores que la curva de la envolvente. De cualquier modo, considerando el círculo con su punto central $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ y con la magnitud del esfuerzo principal máximo (σ_1) menos la magnitud del esfuerzo principal mínimo (σ_3) como su diámetro, la ruptura ocurrirá en el punto donde el círculo toque a la envolvente (Jaeger y Cook, 1979). Los valores de ruptura τ_f y σ_f son determinados como el punto tangente del círculo en la curva A-B (envolvente), y los valores σ_1 y σ_3 de ruptura son denominados como σ_{1f} y σ_{3f} respectivamente. En orden de generar la envolvente de Mohr A-B es necesario conducir varios ensayos triaxiales, (cuando menos tres), y graficar los resultados de σ_{1f} y σ_{3f} de cada ensayo (Fig. 4.5).

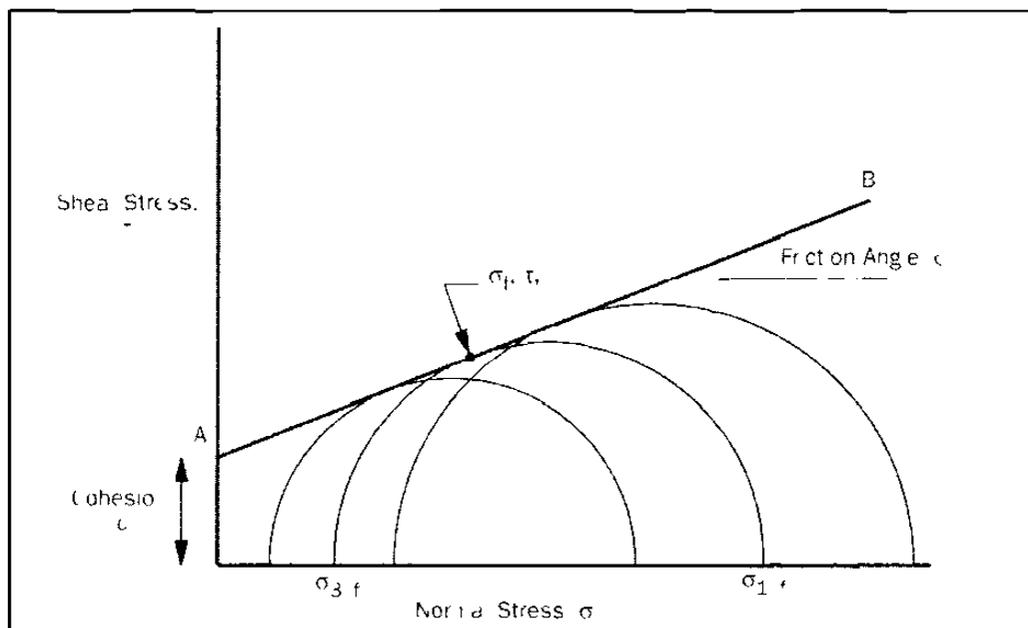


Fig. 4.5 Gráfica de la envolvente de Mohr aplicando valores de ensayos triaxiales. (Kliche, 1999).

4.2.1. Ensayos Triaxiales de los Macizos Rocosos del Sitio de Estudio

Se tomaron muestras de cada una de las Formaciones que albergan a cada uno de los taludes. Los ensayos fueron realizados por el M.C. Victor Manuel Navarro Hernández en el Laboratorio de Mecánica de Rocas dentro de la Unidad Académica de Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Dándose los siguientes resultados:

Formación Zuloaga				
Muestra	Presión de Rotura σ_1 (MPa)	Presión confinante σ_3 (MPa)	Cohesión τ (MPa)	Angulo de fricción interno ϕ (grados)
TL1a	190	6.8	94.292	32.023
TL1b	176	6.8		
TL1c	169	6.8		

Formación Tamaulipas Inferior				
Muestra	Presión de Rotura σ_1 (MPa)	Presión confinante σ_3 (MPa)	Cohesión τ (MPa)	Angulo de fricción interno ϕ (grados)
TL2a	216	6.8	108.936	39.355
TL2b	204	6.8		
TL2c	208	6.8		

Formación Tamaulipas Superior				
Muestra	Presión de Rotura σ_1 (MPa)	Presión confinante σ_3 (MPa)	Cohesión τ (MPa)	Angulo de fricción interno ϕ (grados)
TL4a	201	6.8	108.779	39.276
TL4b	210	6.8		
TL4c	216	6.8		

Formación San Felipe				
Muestra	Presión de Rotura σ_1 (MPa)	Presión confinante σ_3 (MPa)	Cohesión τ (MPa)	Angulo de fricción interno ϕ (grados)
TL5a	167	6.8	90.361	30.058
TL5b	174	6.8		
TL5c	169	6.8		

4.3 Criterio de Barton y Choubey

Barton (1973) desarrolló un modelo empírico para predecir la resistencia al corte de juntas rugosas. Basándose en ensayos y observaciones llevadas a cabo en juntas rugosas producidas “artificialmente” en diferentes materiales, Barton y Choubey (1977) derivaron la siguiente ecuación:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

donde:

JRC = Coeficiente de rugosidad de la junta.

JCS = Resistencia a la compresión de la junta.

τ = Resistencia al corte a través de la junta.

σ_n = Esfuerzo normal actuando en la superficie de la junta.

ϕ_r = Ángulo de rozamiento residual.

El valor de JRC puede ser empíricamente estimado mediante la comparación de perfiles de la superficie rugosa de la junta con 10 perfiles estandarizados (Fig. 4.7a). Este método para la determinación de la rugosidad ha sido aceptado por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Brown, 1981). También se puede estimar mediante el ensayo de inclinación *Tilt Test* (Kliche, 1999) (Fig.4.7b) que consiste en obtener el ángulo α con el cual se inicia el deslizamiento de una cara de la junta con respecto a la otra. El esfuerzo normal efectivo σ'_{no} viene aplicado por el peso propio de la misma muestra, dividiéndolo por el área en que actúa, debidamente corregido por el coseno del propio ángulo. JRC se obtiene en consecuencia mediante la expresión (Ayala *et al*, 1987):

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_{no}} \right)}$$

donde:

α = Ángulo cuando el deslizamiento ocurre, obtenido mediante el *Tilt Test*.

ϕ_r = Ángulo de fricción residual de la superficie de la roca.

JCS = Resistencia a la compresión de la junta.

σ'_{no} = Esfuerzo normal actuando en la superficie de la junta.

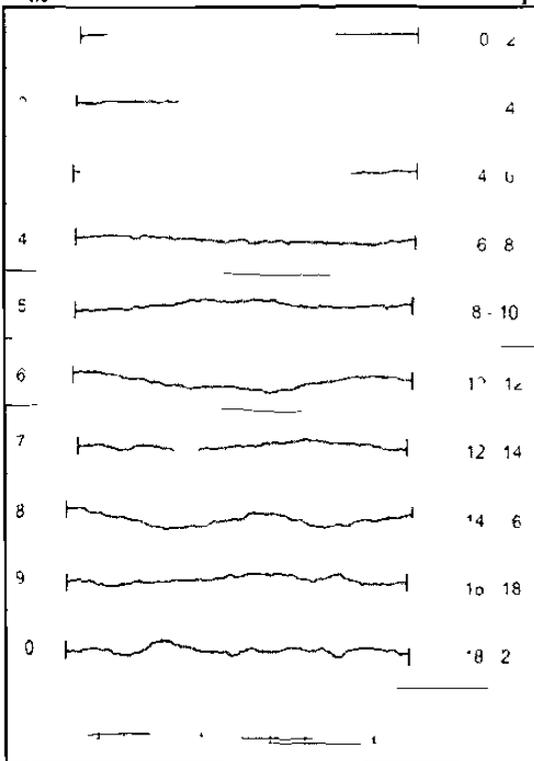


Fig. 4.7 Técnicas para estimar el coeficiente de rugosidad JRC. A la izquierda perfiles estandarizados de Barton (Brown, 1981) para comparar con la rugosidad presente en la junta. Abajo ensayo de Inclinación *Tilt Test*. El ángulo al momento de deslizar los bloques, se considera para el cálculo, del JRC.



JRC tiene un rango de valores desde 0 hasta 20, quedando comprendidas entre 5 para superficies totalmente lisas casi planas y, 15 para rugosas y onduladas. El ángulo de rozamiento residual es menor que el ángulo de rozamiento básico ϕ_b que corresponde a la resistencia de las juntas planas sin meteorizar y que se obtiene mediante el ensayo de inclinación utilizando testigos cilíndricos (Barton, 1985). Esta reducción en el valor es consecuencia de la meteorización y alteración de las juntas. Para obtener ϕ_r se utiliza la expresión dada por Barton y Choubey (1977) basada en la resistencia del martillo de Schmidt (Fig. 4.8):

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R}$$

donde:

ϕ_b - ángulo de fricción básico.

r = rebote del martillo de Schmidt con la superficie húmeda en estado natural.

R = rebote del martillo de Schmidt en seco.

JCS es igual a la resistencia a la compresión simple de la roca σ_c si la junta no está alterada. Este valor se puede obtener por medio del martillo de Schmidt (Fig. 4.8) de acuerdo con Miller (1965) que obtuvo la siguiente relación:

$$\log_{10} \sigma_c = 0.00088\gamma R + 1.01$$

donde:

R = Número de rebote.

γ - Densidad de la roca (KN/m^3).

σ_c - Resistencia a la compresión uniaxial de la junta (MN/m^2).

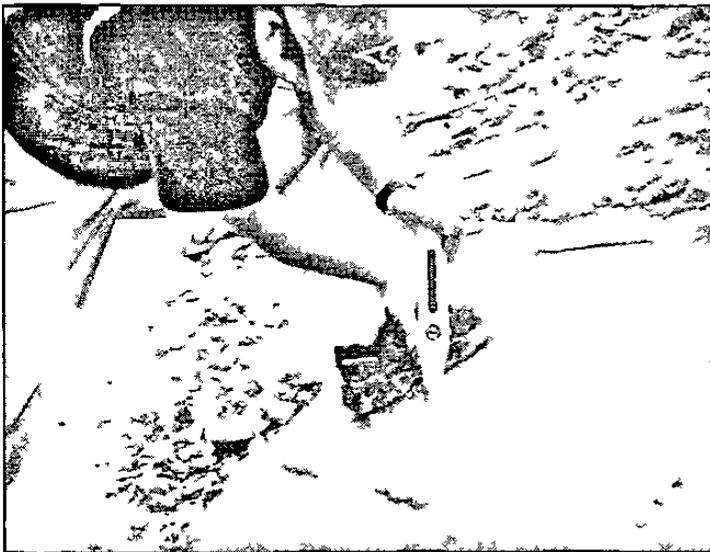


Fig. 4.8 Determinación de la resistencia a la compresión simple de la discontinuidad con el Martillo de Schmidt (esclerómetro). Se aplica el ensayo directamente a la junta, leyendo el valor del rebote al costado del martillo.

Brown (1981) sugirió que el ángulo de fricción pico puede ser estimado utilizando la siguiente ecuación:

$$\phi_p = JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r$$

donde:

ϕ_r = Ángulo de fricción residual.

JRC = Coeficiente de rugosidad de la junta.

JCS = Resistencia a la compresión de la junta.

σ_n = Esfuerzo normal actuando en la superficie de la junta.

4.3.1 Estimación de Ángulos de Fricción y Resistencia al Corte de los Planos de los Taludes en Estudio

Para el cálculo de este valor, se procedió a realizar ensayos mediante la técnica del *Tilt Test* a cada uno de los diferentes macizos donde fueron realizados los taludes, midiendo las dimensiones de cada bloque a deslizar para obtener su peso en función de la densidad de la roca, además de efectuarse ensayos con Martillo de Schmidt en cada una de las discontinuidades para la obtención de la resistencia a la compresión de la junta.

4.3.2 Talud #1

Valores obtenidos mediante ensayos:

	r	R	α Tilt Test	ϕ_b	Dimensiones Bloque	γ KN/m ³
J1	31	37	47°	32°	220x17x20	24
J2	42	56	31°	32°	20x17x15	24
J3	38	59	32°	32°	25x18x20	24

Resultado de los cálculos:

	ϕ_r	JCS	σ_n	σ'_{no}	JRC	ϕ_p	τ
J1	27.89°	68.18	9.8809×10^{-11}	9.8052×10^{-11}	1.61	47°	173.6
J2	27°	155.85	7.4107×10^{-11}	6.7789×10^{-11}	0.32	31°	37.88
J3	24.88°	180.33	9.8809×10^{-11}	8.2429×10^{-11}	0.57	32°	44.11

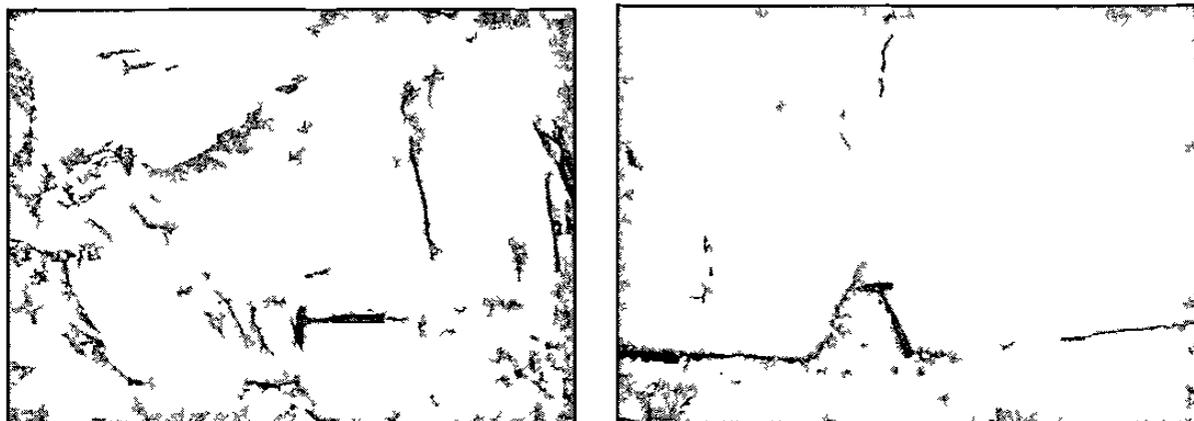


Fig. 4.9. Estado de las discontinuidades presentes para el Talud #1.

En estos resultados se puede apreciar que el valor de J1 que corresponde a la estratificación, muestra un valor alto debido a que se tiene la presencia de juntas estilolíticas que proporcionan un grado de rugosidad que incrementa el ángulo de fricción necesario para el deslizamiento de los bloques de roca (Fig. 4.9). J2 y J3 son planos de diaclasamiento que presentan superficies suaves que nos determinan valores de ángulos de fricción de 31-32°.

4.3.3 Taludes #2 y #3

Valores obtenidos mediante ensayos:

	r	R	α Tilt Test	ϕ_b	Dimensiones Bloque	γ KN/m ³
J1	43	51	35°	33°	20x18x20	24
J2	47	59	34°	33°	22x14x19	24
J3	34	49	32°	33°	21x17x20	24

Resultado de los cálculos:

	ϕ_r	JCS	σ_n	σ'_{no}	JRC	ϕ_p	τ
J1	29.86°	122.21	9.8809×10^{-11}	8.9293×10^{-11}	0.42	35°	39.60
J2	28.93°	180.33	9.3869×10^{-11}	7.9654×10^{-11}	0.41	34°	63.02
J3	30.44°	110.88	9.8809×10^{-11}	8.2429×10^{-11}	0.42	32°	13.62

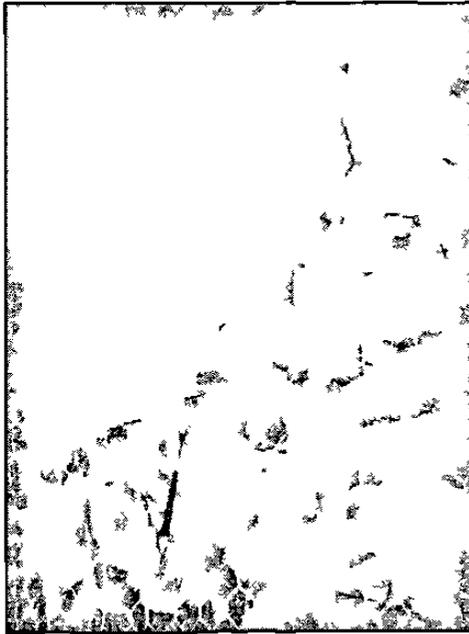


Fig. 4.11. Discontinuidades presentes en el Talud #2 y #3.

Los valores de las juntas tienen una similitud en cuanto a su ángulo de fricción, debido a que sus planos son lisos y presentan casi las mismas características. Se tomaron para ser considerados dichos parámetros en ambos taludes, ya que se encuentran excavados dentro de la misma Formación rocosa. Los valores de la cohesión difieren debido a la resistencia de los planos de las juntas.

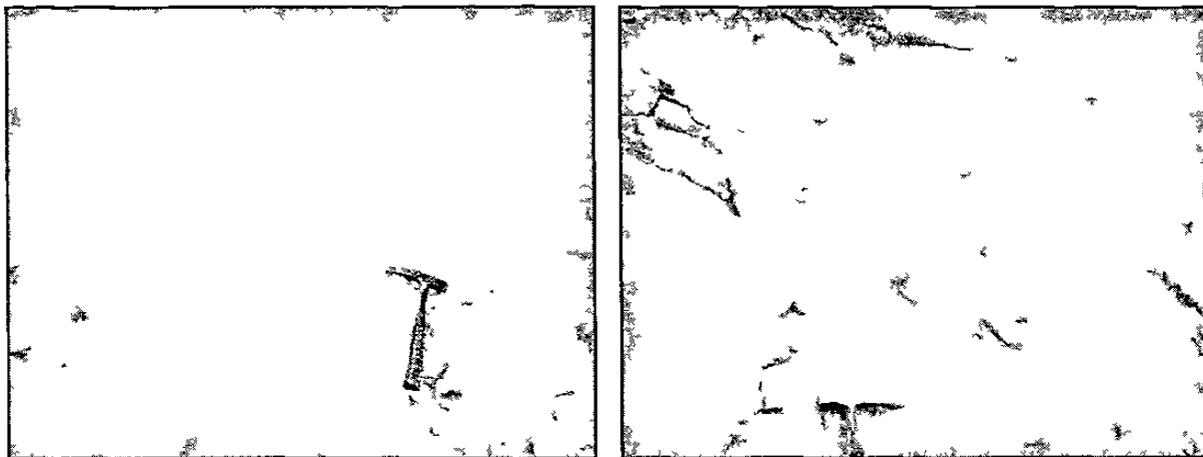
4.3.4 Talud #4

Valores obtenidos mediante ensayos:

	r	R	α Tilt Test	ϕ_b	Dimensiones Bloque	γ KN/m ³
J1	47	55	33°	33°	20x20x20	24
J2	56	64	32°	33°	21x18x15	24
J3	43	52	35°	33°	22x17x18	24

Resultado de los cálculos:

	ϕ_r	JCS	σ_n	σ'_{no}	JRC	ϕ_p	τ
J1	30.09°	148.45	9.8809×10^{-11}	1.3119×10^{-12}	0.20	33°	19.87
J2	30.50°	229.97	7.4107×10^{-11}	6.1822×10^{-11}	0.11	32°	36.54
J3	29.54°	128.30	8.8928×10^{-11}	8.0364×10^{-11}	0.44	35°	30.70



4.12 Aspecto de las discontinuidades que afectan al Talud #4.

Para el valor de J1 correspondiente a la estratificación, se tienen valores bajos de la cohesión debido a que están afectados por el espesor considerable de arcilla dentro de los planos. J2 presenta la mayor resistencia al corte porque contiene un tipo de relleno duro. J3 sus planos son lisos y sin relleno lo cual marca la diferencia entre J2.

4.3.5 Talud #5 y #6

	r	R	α Tilt Test	ϕ_b	Dimensiones Bloque	γ KN/m ³
J1	28	34	31°	32°	20x15x8	23
J2	51	60	30°	32°	20x9x8	23
J3	8	23	30°	32°	20x9x8	23

	ϕ_r	JCS	σ_n	σ'_{no}	JRC	ϕ_p	τ
J1	28.47°	49.90	3.7877×10^{-11}	3.4648×10^{-11}	0.20	31°	2.17
J2	29°	167.64	3.7877×10^{-11}	5.8426×10^{-11}	0.07	27°	9.43
J3	69.50°	14.85	3.7877×10^{-11}	5.8426×10^{-11}	0.00	33°	1.53

El plano de estratificación J1 muestra valores menores a las discontinuidades antes estudiadas, porque son planos lisos con rellenos muy suaves de arcillas, además de que la roca matriz es una caliza arcillosa que disminuye el valor de ϕ_b . J2 y J3 son diaclasas que presentan planos muy poco rugosos además de un relleno suave, ó pueden también no contenerlo, (Fig. 4.13).

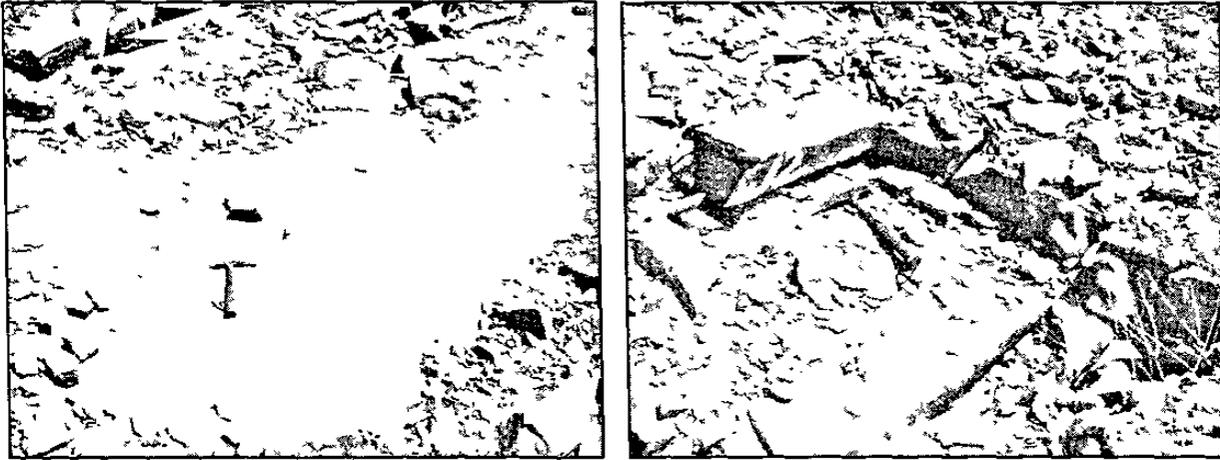


Fig. 4.13 Aspecto de las discontinuidades que afloran en los Taludes 5 y 6.

4.4 Clasificación Geomecánica RMR (Rock Mass Rating)

Desarrollada por Bieniawski (1976) (Tabla 4.1.), propuso una clasificación que tomará en cuenta aspectos que se relacionaran más con el comportamiento del macizo combinando el RQD de Deere (1964) con otras observaciones como la presencia de agua y la alteración de las fracturas. Fue la primera clasificación geomecánica que aportó datos cuantitativos como ángulos de fricción y el tiempo de soporte de un claro activo. Los cinco parámetros básicos que contempla son los siguientes:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- Índice de Calidad de la Roca (RQD) de acuerdo a Deere (1964).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades (rugosidad, continuidad, tamaño de la apertura, meteorización, tipos de rellenos, etc).
- Flujo de agua a través de las juntas.
- Orientación de las discontinuidades.

Para la estimación del RQD, Deere (1964) emplea la recuperación de núcleos extraídos por barrenación a diamante con diámetros de 254 mm ó superiores, mayores a 100 mm entre la longitud barrenada multiplicado por 100, la cual se define como sigue:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de núcleos recuperados} \geq 100 \text{ mm}}{\text{Longitud total barrenada}} \times 100$$

En casos en los cuales se necesita estimar el RQD pero no se tiene acceso a núcleos de barrenación a diamante, Palmstrom (1982) sugiere que en caso de que las discontinuidades sean visibles ya sea en planos expuestos ó adits de exploración, se puede realizar calculando el número de discontinuidades por unidad de volumen de acuerdo a la relación:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de juntas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades conocido como conteo volumétrico de juntas.

Para aplicar el RMR, el macizo rocoso es dividido en regiones estructurales y cada una se analiza por separado. Los límites de la región usualmente coinciden con la estructura característica mayor como una falla ó cambios en la litología. Después se analiza cada una de las características de la roca de acuerdo a la Tabla 4.1a. dándole su respectivo valor respecto a las condiciones observadas. A esa valoración obtenida se le resta un factor de ajuste de acuerdo a la orientación de las discontinuidades con respecto a la obra con las Tablas 4.1b y 4.1f. Ya que se ha restado el rango correspondiente se compara con la Tabla 4.1c para asignar la clase y definición del tipo de roca así como también aplicando el criterio de la Tabla 4.1d, obtener valores del comportamiento de macizo rocoso. El apartado 4.1e se aplica como guía para distinguir el tipo de discontinuidad al momento de hacer la clasificación.

Tabla 4.1 Clasificación Geomecánica RMR de Bieniawski (1989)

a) Parámetros de clasificación y sus valores

1	Resistencia a la Compresión Uniaxial	> 250 MPa	100-250 Mpa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25	1-5	< 1
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.	90° - 100°	75° - 90°	50° - 75°	25%-50%	< 25°		
	Valoración	20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento entre Discontinuidades	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	Valoración	20	15	10	8	5		
4	Estado de las Discontinuidades	Muy rugosas, no continuas, sin separación, bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas, separación < 1 mm, bordes algo meteorizados	Ligeramente rugosas, separación < 1mm, bordes muy meteorizados	Espejos de falla o con relleno < 5mm ó abiertas 1-5mm, diaclasa continua	Relleno blando > 5mm ó abertura > 5mm, diaclasa continua		
	Valoración	30	25	20	10	0		
5	Flujos de Agua en las Discontinuidades	Seco 0.0	Ligeramente húmedo 0.0-0.1	Húmedo 0.1-0.2	Goteando 0.2-0.5	Fluyendo > 0.5		
	Valoración	15	10	7	4	0		

b) Factor de ajuste por orientación de las discontinuidades

Orientación de las discontinuidades:		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valoración:	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-6	-25	-50	

c) Clasificación del macizo rocoso de acuerdo a su valoración

Rango	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Clase No.	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

d) Significado de la clasificación del macizo rocoso

No. Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de sostén	20 años para 15 m de claro	1 año para 10 m de claro	1 semana para 5 m de claro	10 horas para 2,5 m de claro	30 min. para 1 m de claro
Cohesión del macizo (KPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Angulo de fricción (grados)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

e) Pautas para la clasificación de las condiciones de las discontinuidades

Continuidad de discontinuidad (persistencia)	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
Separación (apertura)	Ninguna	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Lisa
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno suave >5mm	Relleno suave <5mm
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Altamente alterada	Descompuesta
	6	5	3	1	0

f) Efecto del rumbo y echado de las discontinuidades

Rumbo perpendicular al rumbo del eje de la obra				Rumbo paralelo al eje de la obra		Echado de 0-20°. Independiente del rumbo
Penetración en sentido del rumbo		Penetración contra el rumbo		Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°	
Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°	Echado 45° - 90°	Echado 20° - 45°			
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy favorable	Regular	Desfavorable

4.5 Clasificación SMR (Slope Mass Rating)

La clasificación SMR, desarrollada por Romana (1995) es una técnica para determinar los factores de ajuste que se necesitan para aplicar la clasificación original RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1976) a los taludes. En este caso dichos factores corresponden al tipo de mecanismo de falla en la cual ocurre el talud rocoso ya que por lo regular la estabilidad está gobernada por las discontinuidades y la intersección de éstas produce superficies que delimitan bloques de roca que fallarán.

Este índice se obtiene del RMR básico sumando un “factor de ajuste”, que es función de la orientación de las discontinuidades (producto de tres subfactores) y un factor de excavación que depende del método utilizado:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (4b)$$

Donde:

RMR = (rango de 0 a 100) Se calcula de acuerdo con los coeficientes de Bieniawski (1976) como la suma de las valoraciones correspondientes a cinco parámetros (Tabla 4.1a): El factor de ajuste de las discontinuidades es producto de tres subfactores (Tabla 4.2):

F1 Paralelismo entre el talud y la discontinuidad

Depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo 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 baja). Estos valores, establecidos empíricamente se ajustan a la expresión:

$$F1 = (1 - \text{sen } \alpha_p - \alpha_f)^2 \quad (4b-1)$$

Donde:

α_p = Dirección del echado de la discontinuidad.

α_f = Dirección del echado del talud.

F2 Inclinación del plano de discontinuidad

Depende del echado de la discontinuidad en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad a la resistencia a esfuerzo cortante de la discontinuidad. Varía entre 1.00 (para juntas con echado superior a 45°) y 0.15 (para juntas con echado inferior a 20°). Fue establecido empíricamente pero puede ajustarse según la relación:

$$F2 = (\tan^2 \psi_p)^2 \quad (4b-2)$$

Donde:

ψ_p = Echado de la discontinuidad.

F2 tiene un valor de 1.0 para mecanismos de falla por vuelco.

F3 Relación echado del talud y echado del plano de discontinuidad

Refleja la relación entre la orientación de los planos de discontinuidad con respecto al talud. Estos valores son los mismos propuestos por Bieniawski (1976) (Tabla 4.1f) que siempre son negativos.

Para roturas planas F3 expresa la probabilidad de que las juntas afloren en el talud. Se supone que las condiciones son normales cuando el echado medido de la familia de juntas es igual al del talud y por lo tanto aflorarán algunos planos. Cuando el talud se inclina más que las juntas, casi todas aflorarán y las condiciones serán muy desfavorables, lo que supone un valor de F3 de -60 (para $\psi_f - \psi_p > 10^\circ$), ó desfavorables lo que supone un valor de F3 de -50 (para $0 < \psi_f - \psi_p < 10^\circ$). La diferencia con el valor de F3 normal (-25) es muy grande.

Factor F1						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$\alpha_p - \alpha_f$	$> 30^\circ$	$30^\circ-20^\circ$	$20^\circ-10^\circ$	$10^\circ-5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$\alpha_p - \alpha_f - 180^\circ$					
P/T	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Factor F2						
P	ψ_p	$< 20^\circ$	$20^\circ-30^\circ$	$30^\circ-35^\circ$	$35^\circ-45^\circ$	$> 45^\circ$
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F2	1	1	1	1	1
Factor F3						
P	$\psi_p - \psi_f$	$> 10^\circ$	$10^\circ-0^\circ$	0°	$0^\circ-(-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\psi_p + \psi_f$	$< 110^\circ$	$110^\circ-120^\circ$	$> 120^\circ$		--
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60
P Rotura Plana		α_f dirección del echado del talud	α_p dirección del echado de la discontinuidad			
T Rotura por vuelco		ψ_f echado del talud	ψ_p echado de las juntas			

Tabla 4.2 Factor de ajuste para las discontinuidades para la Clasificación SMR (Romana, 1995).

F4 Factor de Ajuste según el Método de Excavación

Este ha sido establecido empíricamente de acuerdo a los siguientes criterios (Tabla 4.3):

- Los taludes naturales son más estables, a causa de los procesos previos de erosión sufridos por el talud, y de los mecanismos internos de protección que muchos de ellos poseen (vegetación, desecación superficial, drenaje torrencial, etc.), para ello se otorga un valor de $F_4 = +15$.
- Utilizar la técnica del precorte en las voladuras aumenta la estabilidad de los taludes en media clase. $F_4 = +10$.
- La técnica de voladura suavizada (recorte o post-corte) bien calculada y ejecutada, también aumenta la estabilidad de los taludes. $F_4 = +8$.
- Las voladuras normales aplicadas con métodos razonables no modifican la estabilidad. $F_4 = 0$.
- Las voladuras defectuosas son muy frecuentes y pueden empeorar la estabilidad propia del terreno. $F_4 = -8$.
- La excavación mecánica de los taludes por ripeado sólo es posible cuando el macizo rocoso está muy fracturado ó se excava roca blanda. Con frecuencia se combina con pre-voladuras que contemplan poco criterio de diseño. Las caras del talud presentan dificultades de acabado. Por ello el método ni mejora ni empeora la estabilidad. $F_4 = 0$.

Método de excavación	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o mecánico	Voladura deficiente
Valor F4	15	10	8	0	-8

Tabla 4.3 Factor de ajuste según el método de excavación del talud para la Clasificación SMR (Romana, 1995).

Para aplicar esta clasificación, Romana (1985) hace las siguientes observaciones:

- La clasificación no tiene instrucciones específicas para las roturas en cuña. El procedimiento a seguir es obtener el índice SMR para cada una de las familias de las juntas. El valor más bajo obtenido para cada familia empíricamente, será el representativo del talud.
- En rocas meteorizadas y en las evolutivas, la clasificación debe ser aplicada dos veces: para la situación inicial de roca sana y para la situación futura de la roca meteorizada. Los índices obtenidos serán distintos.

Según el valor del índice SMR, se obtienen 5 clases de estabilidad, definidas en la siguiente tabla (Tabla 4.4):

Clase No.	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Regular	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

Tabla 4.4 Clases de estabilidad de acuerdo al SMR (Romana, 1995).

Los valores límites del SMR encontrados empíricamente para cada tipo de mecanismo de falla se muestran en la tabla siguiente (Tabla 4.5). Todos los taludes con valores de SMR inferiores fallan en un lapso muy corto de tiempo. No se han encontrado taludes con valores menores a 10, lo cual indica que no son físicamente factibles.

Roturas planas		Roturas en cuña	
SMR > 60	Ninguna	SMR > 75	Muy pocas
60 > SMR > 40	Importantes	75 > SMR > 49	Algunas
40 > SMR > 15	Muy grandes	55 > SMR > 40	Muchas
Roturas por vuelco		Roturas completas (tipo suelo)	
SMR > 65	Ninguna	SMR > 30	Ninguna
65 > SMR > 50	Menores	30 > SMR > 10	Posible
40 > SMR > 30	Muy grandes		

Tabla 4.5 Valores límite para la clasificación SMR (Romana, 1995).

4.5.1 Valoración Geomecánica de los Macizos Rocosos del Área de Estudio

4.5.1.1 Talud #1 (Km. 26+890)

La roca presente es una caliza micrítica de color gris oscuro con una resistencia a la compresión uniaxial de 190 MPa. Las mediciones en el sitio de las discontinuidades presentes arrojan un RQD de 90%. Existen tres tipos de discontinuidades: primeramente la estratificación (J1) con espesor de estratos de entre 0.4 y 1.8 m con una superficie rugosa de estructuras cone in cone rellenas con material suave de arcillas; las otras dos discontinuidades son diaclasas tectónicas con un espaciamiento de entre 0.4 y 1.0 m teniendo una continuidad de aproximadamente de 1.0 m, estando separadas por un relleno suave de arcillas y planos ligeramente rugosos.

Rock Mass Rating (RMR):

- Resistencia a la Compresión Uniaxial = 190 MPa Valor = 12
- Índice de Calidad de la Roca RQD = 90% Valor = 20
- Espaciamiento entre Discontinuidades: = 0.5 – 1.0 m Valor = 15
- Estado de las Discontinuidades:
 - Continuidad: 1 – 3 m Valor = 4
 - Separación de planos de juntas: 1 – 5 mm Valor = 1
 - Rugosidad de los planos: Suave Valor = 1
 - Relleno de las juntas: Relleno Suave > 5 mm Valor = 2
 - Grado de alteración: inalterado Valor = 6
- Flujo de Agua: Seco Valor = 14

$$\text{Suma de los Parámetros} = 12 + 20 + 15 + 14 + 15 = 76$$

Valor total de la Clasificación RMR = 76

Clase II Roca de Buena Calidad.

Slope Mass Rating (SMR)

Para hacer la clasificación mediante el SMR para mecanismos en cuña, se sugiere que se realice en forma independiente a cada plano que forma el bloque. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud y los planos los cuales corresponden a:

TL = 061/72, J2 = 088 67 Y J3 = 017/83.

J2

- Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 88^\circ - 61^\circ = 27^\circ$; una dirección del echado favorable. Valor = 0.40
- Factor F2 = $\psi_p - 67^\circ$; un echado muy desfavorable. Valor = 1.0
- Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 67^\circ - 72^\circ = -5^\circ$; un echado desfavorable. Valor = -50
- Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. Valor = 0

J3

- Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 17^\circ - 61^\circ - 44^\circ$; dirección del echado muy favorable. Valor = 0.15
- Factor F2 = $\psi_p = 83^\circ$; un echado muy desfavorable. Valor = 1.0
- Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 83^\circ - 72^\circ = 9^\circ$; un echado favorable. Valor = -6
- Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. Valor = 0

Por regla general del SMR se toman los valores más bajos, en este caso se clasificará respecto a J3:

$$\begin{aligned} \text{SMR} &= \text{RMR} + (\text{F1} \times \text{F2} \times \text{F3}) + \text{F4} \\ \text{SMR} &= (76) + [(0.15)(1.0)(-6)] + (0) \\ \text{SMR} &= 76 + (-6) \end{aligned}$$

$$\text{SMR} = 70$$

Clase II Buena Estabilidad del Talud.

4.5.1.2 Talud #2 (Km. 29+080)

Esta cortando en una caliza micrítica con una resistencia a la compresión uniaxial de 230 MPa. Las mediciones para obtener el índice de recuperación arrojaron valores de 82%. Las discontinuidades presentes corresponden en primer término a la estratificación (J1) que tiene espesores masivos de entre 0.5 y 2.5 m con intercalaciones de arcillas y calcita cristalizada además de estilolitas paralelas a la estratificación. Los demás planos son diaclasas de planos lisos sin relleno. La continuidad de estos planos es relativo a la estratificación.

Rock Mass Rating (RMR):

- Resistencia a la Compresión Uniaxial – 230 MPa Valor = 12
- Índice de Calidad de la Roca RQD = 82% Valor = 17
- Espaciamiento entre Discontinuidades: = 0.5 – 2.5 m Valor = 15
- Estado de las Discontinuidades:

○ Continuidad: 1 – 3 m	Valor = 4
○ Separación de planos de juntas: 1 – 5 mm	Valor = 1
○ Rugosidad de los planos: Lisos	Valor = 0
○ Relleno de las juntas: Sin relleno	Valor = 6
○ Grado de alteración: ligero	Valor = 5
	Valor = 16
▪ Flujo de Agua: Seco	Valor = 15
Suma de los Parámetros = 12 + 17 + 15 + 16 + 15 = 75 .	

Valor total de la Clasificación RMR = 75

Clase II Roca de Buena Calidad.

Slope Mass Rating (SMR):

De acuerdo al análisis cinemático, se tiene en este talud un mecanismo de vuelco de bloques. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud y los planos los cuales corresponden a: TL = 323/85, J3 = 152/75 Y J4 = 161/82.

J3

▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f - 180^\circ = 152 - 323 - 180 = 9^\circ$; desfavorable.	Valor = 0.85
▪ Factor F2 = $\psi_p = 75^\circ$; muy desfavorable.	Valor = 1.0
▪ Factor F3 = $\psi_p + \psi_f = 75^\circ + 85^\circ = 160^\circ$; normal.	Valor = -25
▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal.	Valor = 0

J4

▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f - 180^\circ = 161 - 323 - 180 = 18^\circ$; normal.	Valor = 0.70
▪ Factor F2 = $\psi_p = 82^\circ$; muy desfavorable.	Valor = 1.0
▪ Factor F3 = $\psi_p + \psi_f - 82^\circ + 85^\circ = 167^\circ$; normal.	Valor = -25
▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal.	Valor = 0

Por regla general del SMR se toman los valores mas bajos, en este caso se clasificara respecto a J3:

$$\begin{aligned} \text{SMR} &= \text{RMR} + (\text{F1} \times \text{F2} \times \text{F3}) + \text{F4} \\ \text{SMR} &= (75) + [(0.85)(1.0)(-25)] + (0) \\ \text{SMR} &= 75 + (-21) \end{aligned}$$

$$\text{SMR} = 54$$

Clase III Regular Estabilidad del Talud.

4.5.1.3 Talud #3 (Km. 29+306)

Para objeto de la clasificación RMR de este talud, se tomará la anterior, ya que litológicamente se encuentran en la misma Formación rocosa. El factor que cambia es la orientación de las discontinuidades con respecto al talud.

Rock Mass Rating (RMR):

▪ Resistencia a la Compresión Uniaxial = 230 MPa	Valor = 12
▪ Índice de Calidad de la Roca RQD = 82%	Valor = 17
▪ Espaciamiento entre Discontinuidades: = 0.5 – 2.5 m	Valor = 15
▪ Estado de las Discontinuidades:	
○ Continuidad: 1 – 3 m	Valor = 4
○ Separación de planos de juntas: 1 – 5 mm	Valor = 1
○ Rugosidad de los planos: lisos	Valor = 0
○ Relleno de las juntas: sin relleno	Valor = 6
○ Grado de alteración: ligero	Valor = 5
	Valor = 16
▪ Flujo de Agua: Seco	Valor = 15
Suma de los Parámetros = 12 + 17 + 15 + 16 + 15 =	<u>75</u>

Valor total de la Clasificación RMR = 75
Clase II Roca de Buena Calidad.

Slope Mass Rating (SMR):

Para hacer la clasificación mediante el SMR para mecanismo presente de cuña, se aplicará el criterio de clasificación a cada plano. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud además de los planos de discontinuidades, los cuales corresponden a: TL = 313/85, J1 = 260/36 Y J2 = 054/50.

J1

▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 260^\circ - 313^\circ - 53^\circ$; muy favorable.	Valor = 0.15
▪ Factor F2 = $\psi_p = 36^\circ$; un echado desfavorable.	Valor = 0.85
▪ Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 36^\circ - 85^\circ = -49^\circ$; muy favorable.	Valor = 0
▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal.	Valor = 0

J3

▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 054^\circ - 313^\circ = 259^\circ$; echado muy favorable.	Valor = 0.15
▪ Factor F2 = $\psi_p = 50^\circ$; un echado muy desfavorable.	Valor = 1.0
▪ Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 50^\circ - 85^\circ = -35^\circ$; muy desfavorable.	Valor = -60
▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal.	Valor = 0

Por regla general del SMR se toman los valores mas bajos, en este caso se clasificara respecto a J1:

$$\begin{aligned} \text{SMR} &= \text{RMR} + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \\ \text{SMR} &= (75) + [(0.15)(0.85)(0)] + (0) \\ \text{SMR} &= 75 + (-9) \end{aligned}$$

SMR = 66

Clase II Buena Estabilidad del Talud.

4.5.1.4 Talud #4 (Km. 31+280)

El talud esta conformado por una caliza micrítica de resistencia a la compresión uniaxial de 230 MPa, estratificada en espesores de 0.5 a 1.5 m intercalados por capas de arcilla y calcita. Las mediciones in situ de la calidad de la roca nos da un valor RQD de 78%. Las diaclasas se encuentran rellenas de arcilla roja con signos de alteración y disolución con una apertura de 2 mm, las paredes de los planos están lisas y se encuentran muy soldadas con espaciamiento de 0.1 a 0.5 m, mientras que otro tipo de fracturas tiene planos lisos sin ningún relleno con un espaciamiento de 0.4 a 0.6 m. También se observan estilolitas dentro de las capas, siendo paralelas a la estratificación. El mecanismo analizado cinemáticamente corresponde a cuñas.

Rock Mass Rating (RMR):

▪ Resistencia a la Compresión Uniaxial = 230 MPa	Valor = 12
▪ Índice de Calidad de la Roca RQD = 78%	Valor = 17
▪ Espaciamiento entre Discontinuidades: - 0.1 - 0.5 m	Valor = 10
▪ Estado de las Discontinuidades:	
○ Continuidad: 1 - 3 m	Valor = 4
○ Separación de planos de juntas: 1 - 5 mm	Valor = 1
○ Rugosidad de los planos: lisos	Valor = 0
○ Relleno de las juntas: rellenos suaves >5mm	Valor = 2
○ Grado de alteración: moderada	Valor = 3
	Valor = 10
▪ Flujo de Agua: Seco	Valor = 15
Suma de los Parámetros = 12 + 17 + 15 + 10 + 15 = 64	

Valor total de la Clasificación RMR = 64
Clase II Roca de Buena Calidad

Slope Mass Rating (SMR):

Para hacer la clasificación mediante el SMR para mecanismo presente de cuña, se aplicará el criterio de clasificación a cada plano. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud además de los planos de discontinuidades, los cuales corresponden a: TL = 309 81, J3 = 340 78 Y J5 = 256/80.

J3

▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 340^\circ - 309^\circ - 31^\circ$; muy favorable.	Valor = 0.15
▪ Factor F2 = $\psi_p - 78^\circ$; un echado muy desfavorable.	Valor = 1.0
▪ Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 78^\circ - 81^\circ = -3^\circ$; desfavorable.	Valor = -50

- Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. Valor = 0

J5

- Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f - 256^\circ - 309^\circ = 53^\circ$; muy favorable. Valor = 0.15
- Factor F2 = $\psi_p = 80^\circ$; muy desfavorable. Valor = 1.0
- Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 80^\circ - 81^\circ = -1^\circ$; desfavorable. Valor = -50
- Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. Valor = 0

Por regla general del SMR se toman los valores mas bajos, en este caso ambas juntas tienen el mismo factor de reducción:

$$\begin{aligned} \text{SMR} &= \text{RMR} + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \\ \text{SMR} &= (64) + [(0.15)(1.0)(-50)] + (0) \\ \text{SMR} &= 64 + (-8) \end{aligned}$$

$$\text{SMR} = 56$$

Clase III Regular Estabilidad del Talud.

4.5.1.5 Talud #5 (Km. 31+300)

Está comprendido dentro de calizas arcillosas con una resistencia a la compresión uniaxial de 170 MPa, con un índice de calidad de la roca de 73%. La estratificación tiene espesores de 0.3 a 0.5 m con intercalaciones de lutitas y arcillas. Las fracturas tienen un espaciamiento de 0.1 a 0.25 m, encontrándose poco alteradas con rellenos de calcita en algunos casos y con paredes lisas. La continuidad de éstas es pequeña, teniendo como longitudes de 1 m. No se aprecian corrientes o flujos de agua.

Rock Mass Rating (RMR):

- Resistencia a la Compresión Uniaxial = 170 MPa Valor = 12
 - Índice de Calidad de la Roca RQD = 73% Valor = 17
 - Espaciamiento entre Discontinuidades: 0.1 – 0.25 m Valor = 10
 - Estado de las Discontinuidades:
 - Continuidad: 1 m Valor = 6
 - Separación de planos de juntas: 1 – 5 mm Valor = 1
 - Rugosidad de los planos: Lisos Valor = 0
 - Relleno de las juntas: Rellenos suaves >5mm Valor = 2
 - Grado de alteración: Ligero Valor = 5
 - Flujo de Agua: Seco Valor = 14
- Suma de los Parámetros – 12 + 17 + 15 + 14 + 15 = 73

Valor total de la Clasificación RMR = 73
Clase II Roca de Buena Calidad

Slope Mass Rating (SMR):

De acuerdo al análisis cinemático se obtuvo que el mecanismo de falla corresponde a deslizamiento planar, entonces la clasificación se tomará como referencia el plano que desliza. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud además del plano de deslizamiento, los cuales corresponden a: $TL = 280\ 70$, $J1 = 271/46$.

J1

- | | |
|---|--------------|
| ▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 271^\circ - 280^\circ = 9^\circ$; desfavorable. | Valor = 0.85 |
| ▪ Factor F2 = $\psi_p - 46^\circ$; muy desfavorable. | Valor = 1.0 |
| ▪ Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 46^\circ - 70^\circ = -24^\circ$; muy desfavorable. | Valor = -60 |
| ▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. | Valor = 0 |

$$\begin{aligned} SMR &= RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \\ SMR &= (73) + [(0.85)(1.0)(-60)] + (0) \\ SMR &= 68 + (-51) \end{aligned}$$

SMR = 22

Clase II Mala Inestabilidad del Talud.

4.5.1.6 Talud #6 (Km. 31+770)

Se ubica dentro de la misma formación rocosa del talud anterior, así que tomaremos los mismos parámetros para la clasificación.

Rock Mass Rating (RMR):

- | | |
|--|------------|
| ▪ Resistencia a la Compresión Uniaxial = 170 MPa | Valor = 12 |
| ▪ Índice de Calidad de la Roca RQD = 73% | Valor = 17 |
| ▪ Espaciamiento entre Discontinuidades: 0.1 – 0.25 m | Valor = 10 |
| ▪ Estado de las Discontinuidades: | |
| ○ Continuidad: 1 m | Valor = 6 |
| ○ Separación de planos de juntas: 1 – 5 mm | Valor = 1 |
| ○ Rugosidad de los planos: Lisos | Valor = 0 |
| ○ Relleno de las juntas: Rellenos suaves >5mm | Valor = 2 |
| ○ Grado de alteración: Ligero | Valor = 5 |
| | Valor = 14 |
| ▪ Flujo de Agua: Seco | Valor = 15 |

Suma de los Parámetros = 12 + 17 + 15 + 14 + 15 = 73

Valor total de la Clasificación RMR = 73
Clase II Roca de Buena Calidad

Slope Mass Rating (SMR):

De acuerdo al análisis cinemático se obtuvo que el mecanismo de falla corresponde a deslizamiento planar, entonces la clasificación se tomará como referencia el plano que desliza. Los datos necesarios para proceder son las direcciones del echado y echados del talud además del plano de discontinuidad, los cuales corresponden a: TL = 280 40, J1 = 267/27.

J1

- | | |
|---|--------------|
| ▪ Factor F1 = $\alpha_p - \alpha_f = 267^\circ - 280^\circ = 13^\circ$; normal. | Valor = 0.70 |
| ▪ Factor F2 = $\psi_p = 27^\circ$; un echado favorable. | Valor = 0.4 |
| ▪ Factor F3 = $\psi_p - \psi_f = 27^\circ - 40^\circ = -13^\circ$; muy desfavorable. | Valor = -60 |
| ▪ Factor F4 = Se excavó el talud por medio de voladura normal. | Valor = 0 |

$$\begin{aligned} \text{SMR} &= \text{RMR} + (\text{F1} \times \text{F2} \times \text{F3}) + \text{F4} \\ \text{SMR} &= (73) + [(0.7)(0.4)(-60)] + (0) \\ \text{SMR} &= 73 + (-17) \end{aligned}$$

$$\text{SMR} = 56$$

Clase III de Regular Estabilidad del Talud.

4.6 Zonificación de Unidades Litológicas

El agrupamiento de zonas homogéneas que tiene como objetivo la realización de la Carta Ingeniero Geológica anexada a este trabajo, tuvo como base primeramente la descripción litológica de cada una de las Formaciones geológicas, además de sus características estructurales y mecánicas, de acuerdo a las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISMR, 1981). Para definir el grado de intemperismo se aplicó la clasificación de Einsele *et al* (1985), donde define desde el rango W0 para rocas masivas con poco fracturamiento si ningún tipo de alteración, W1 para rocas con dos o mas familias de fracturamiento ligeramente alteradas, W2 para rocas con poco espaciamiento entre discontinuidades ligeramente alteradas, W3 para roca fracturada con signos de alteración, W4 para roca desintegrada con signos de alteración y, W5 denominado a rocas completamente desintegradas como apariencia de suelo.

Zona Homogénea I *Calizas masivas*

Se agrupan las Formaciones Novillo, Zuloaga, Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior. Se incluye a la Formación Otates por encontrarse dentro de las calizas Tamaulipas y su espesor no influye en el comportamiento general de la zona. Normalmente afloran en estratos gruesos a masivos con pequeñas intercalaciones de arcillas. Algunas de estas Formaciones presentan carsticidad y canales de disolución. El diaclasamiento muestra una continuidad que es interrumpida sólo por el espesor de los estratos con rellenos principalmente de arcillas con bajos signos de alteración. Normalmente cuentan con una resistencia a la compresión uniaxial de entre 190 y 230 MPa. Tiene un grado de intemperismo (W0) a (W1).

Zona Homogénea II *Rocas clásticas*

Se agrupan dentro de esta zona las Formaciones Huizachal, La Joya, Olvido y Méndez. Están compuestas de intercalaciones ó bancos de conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas, en estratos laminares a medianos. Corresponden a macizos de baja a media calidad en cuanto a la resistencia se refiere. Contienen poco fracturamiento tectónico sin ningún tipo de alteración. Muestra un grado de intemperismo en fragmentos de roca de (W1) a (W2).

Zona Homogénea III *Calizas con intercalaciones*

En esta zona están agrupadas las Formaciones La Casita, Taraises, Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe. Generalmente presentan una estratificación delgada a media con intercalaciones de otro material como lutitas ya arcillas. En sí, los bancos de caliza son arcillosos ó arenosos, de calidad media a buena, mientras que las intercalaciones son fácilmente intemperizables, produciendo mecanismos de descalce. La resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta para calizas arcillosas es de 170 MPa. Presenta grado de intemperismo (W3).

Zona Homogénea IV *Coluvión*

Se tienen espesores de este material de ladera hasta de 8 m, esta formado por fragmentos angulosos a subangulosos de composición calcárea principalmente, con diámetros variables, inmersos en un cementante arcilloso. Este material es fácilmente intemperizable y muestra canales de erosión pluvial además de agrietamientos. Se encuentra dentro del rango de intemperismo (W5).