

ESTABILIDAD Y MEDIDAS DE SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL HERRADURA CHORRILLOS APLICANDO LOS SOFTWARES RMR, DIPS Y SISTEMA Q DE BARTON

Manuel Uriel Aspilcueta Asencios
manueluriel@hotmail.com

Susana Elvira Orellana Palomino
susan.eop@gmail.com

David Alejandro Valencia Zapata
dvalencia14@gmail.com

CURSO: GEOLOGÍA APLICADA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

RESUMEN: El siguiente trabajo de investigación, muestra la aplicación del software DIPS y las medidas de sostenimiento para la evaluación del túnel La Herradura en el distrito de Chorrillos. En el siguiente informe, presentamos la geología del lugar que es básicamente la formación la Herradura de arenisca silicificada. Luego, se analiza los datos de campo tomados en las estaciones geomecánicas. Estos datos son ingresados al software DIPS y analizados los principales planos de discontinuidades para una posterior evaluación de las fallas del túnel, finalizando con la aplicación de las medidas de sostenimiento y conclusiones.

1 INTRODUCCIÓN

En los proyectos de ingeniería civil destinados a trabajar como túneles, se requiere bastante y un alto nivel de precisión en la información de la geología y geotecnia del terreno en estudio.

Ya que una mala referencia en cuanto a estos estudios, llevaría a consecuencias no deseadas; en base a los estudios geológicos y geotécnicos podemos obtener información valiosa del proyecto como por ejemplo la estabilidad o inestabilidad que presenta o podrá presentar durante su construcción.

Actualmente, con la tecnología que se tiene, es posible conocer la inestabilidad presente en un túnel mediante el uso de un software y poder tomar medidas al respecto; para el presente trabajo en particular el túnel en estudio fue la Herradura.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Allá por 1910, un grupo de capitalistas un tanto visionarios, formo una Compañía que tendió una línea de tranvías entre Lima y

Chorrillos, era la Compañía Nacional de Tranvía Eléctrico (CNET) conocido como "La Nacional".

Los Directores de "La Nacional" pronto comprendieron la importancia que alcanzaría la Herradura y contrataron los servicios del Ing. don Alejandro Guevara para que estudiase la factibilidad y ejecución de un túnel, ya que la vía por el lado del mar, era muy costosa y un tanto peligrosa. Así, con este túnel, véase fig.1, se permitiría el paso de sus tranvías hasta la playa misma.



Figura 1: Construcción del túnel la Herradura.

2.2 Macizo Rocos

Se define al macizo rocoso como el conjunto de rocas condicionadas con diaclasas, fallas, flujos de agua, grado de meteorización, etc.

En el comportamiento mecánico de los macizos rocosos, influyen las características geológicas como la litología, estratigrafía, estructura geológica y los estados de esfuerzos; y estos se deben a los procesos geológicos ocurridos en este.

2.2.1 Influencia de los procesos geológicos

Las características o parámetros más significativos de su comportamiento son las condiciones de fractura y las condiciones de resistencia. De acuerdo al número de fracturas por metro lineal los macizos rocosos se clasifican, según la mecánica de rocas en:

Cuadro 1

Descripción	Fracturas/metro
Masiva	< 2.
Levemente fracturada	2.-6.
Moderadamente fracturada	6.-12.
Muy fracturada	13.-20.
Intensamente fracturada	> 20.
Triturada	

2.2.2 Influencia de la litología

Esta influencia responde a los siguientes puntos: tipo de roca y grado de alteración, en un macizo rocoso es importante saber quién gobierna, por ejemplo pueden ser las discontinuidades.

2.2.3 Estructuras geológicas

Esto ayuda a definir lo siguiente:

- Zonas y planos de debilidades
- Concentración de tensiones
- Zonas proclives a la meteorización
- Flujos de agua, etc.

2.2.4 Los esfuerzos naturales

El conocimiento de las tensiones que puede llegar a soportar el material rocoso ante unas determinadas condiciones a que están sometidos en la naturaleza permite evaluar su comportamiento mecánico y abordar el diseño de estructuras y obras de ingeniería.

Los esfuerzos actuantes en el macizo son producto de su historia geológica.

2.3 Caracterización de la matriz rocosa

2.3.1 Identificación

Se reconocerán los minerales constituyentes de la roca, identificándolas y clasificándolas; se completará la identificación de las rocas definiendo la forma y tamaño de los granos, color, transparencia y dureza.

2.3.2 Meteorización

Para poder clasificar el grado de meteorización de una roca, nos basamos en el cuadro 2.

Cuadro 2

Descripción del grado de meteorización	
Término	Descripción
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el Grado de cambio.
Desintegrada	La roca esta alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fabrica original. La roca es friable, pero los granos de los minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca esta alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.
(ISRM, 1981).	

2.3.3 Resistencia a la compresión

Al igual que el anterior ítem, este se puede clasificar usando el siguiente cuadro, y para determinarlo se pueden usar ensayos de campo como el ensayo de carga puntual PLT o martillo de Schmidt.

Cuadro 3

Clasificación en base a la resistencia de la roca	
Resistencia a compresión simple (Mpa)	Descripción
1 a 5	Muy blanda
5 a 25	Blanda
25 a 50	Moderadamente dura
50 a 100	Dura
100 a 250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

(ISRM, 1981).

2.4 Descripción de las discontinuidades

Entre las principales características tenemos a la orientación, espaciamiento, persistencia, rugosidad, abertura, relleno y filtración; a continuación mostraremos algunos.

2.4.1 Orientación

Queda definida por la dirección de buzamiento que se puede medir con la brújula como se aprecia en la figura 2 (b).

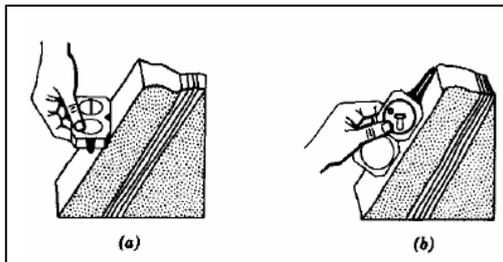


Figura 2: Medición de la dirección de buzamiento.

2.4.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre dos planos de discontinuidades, condiciona el tamaño de bloques. Y una vez medido se puede clasificar con ayuda del cuadro 4.

Cuadro 4

Descripción de la continuidad	
Continuidad	Longitud (m)
Muy baja continuidad	< 1

Baja continuidad	1 a 3
Continuidad media	3 a 10
Alta continuidad	10 a 20
Muy alta continuidad	> 20

(ISRM, 1981).

2.4.3 Continuidad o Persistencia

Se define como la extensión superficial según la dirección del plano y según su buzamiento como se puede apreciar en la figura 3.

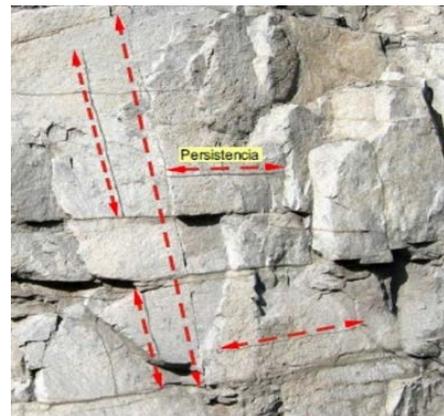


Figura 3: Persistencia de un macizo rocoso.

2.4.4 Rugosidad

Ondulación en la superficie de la matriz rocosa.

2.5 Parámetros que definen el macizo rocoso.

2.5.1 Número y orientación de familias de discontinuidades

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. La orientación medida de una familia de discontinuidades se evalúa mediante la proyección estereográfica, de hecho en este trabajo para evaluar esto se hizo uso del programa DIPS.

2.5.2 Tamaño de Bloque y Grado de Fracturación

El tamaño del bloque queda definido con el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad; el grado de fracturación habitualmente se

expresa por el índice RQD (Rock Quality Designation)

2.5.3 Grado de meteorización

La evaluación del grado de meteorización se realiza por observación directa del afloramiento y en ocasiones puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la meteorización de la matriz rocosa.

2.6 Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Para poder evaluar el macizo rocoso, principalmente importa conocer la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturamiento y los esfuerzos activos. A continuación vemos dos formas habituales de clasificar.

2.6.1 Rock Mass Rating (RMR)

Desarrollada por Bieniawski en 1973, el cual para poder clasificar el macizo se apoya de los siguientes parámetros.

1. Resistencia a la roca intacta
2. RQD

$$RQD = \frac{\sum \text{Long de testigos} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud perforada}} \times 100$$

3. Espaciamiento de las discontinuidades
4. Estado de discontinuidades
5. Condiciones de agua subterránea
6. Orientación de las discontinuidades

Contando con estos seis parámetros, los macizos se pueden clasificar de la siguiente manera.

Cuadro 5

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Angulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	>4 Kg/cm ²	>45°
II	Buena	80-61	3-4 Kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 Kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 Kg/cm ²	15°-25°
V	Muy Mala	<20	<1 Kg/cm ²	<15°

2.6.2 Índice Q de Barton

Para obtener el valor numérico de este índice "Q" plantea la siguiente ecuación:

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

Dónde:

RQD = Índice de Deere
 J_n = Índice de diaclasado
 J_r = Índice de rugosidad de las discontinuidades

J_a = Índice de alteración de las discontinuidades

J_w = Factor de ajuste por presencia de agua

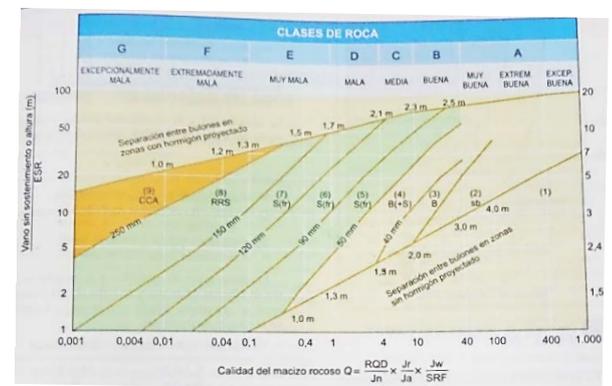
SRF = Factor de ajuste por condiciones tensionales

2.7 Medidas de Sostenimiento a partir del Q de Barton

ESR(Excavation Support Ratio)

Tabla 1. ESR de acuerdo al tipo de Proyecto

Valores del índice ESR de la Clasificación Q		ESR
A	Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1,6-2,0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1,2-1,3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquiles e intersecciones de túneles.	0,9-1,1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5-0,8



1. Sin sostenimiento
2. Bulonado puntual sb.
3. Bulonado sistemático, B
4. Bulonado sistemático con hormigón proyectado, 40-100 mm, B+S
5. Hormigón con fibras, 50-90 mm y bulonado S(fr)+B
6. Hormigón con fibras, 90-120 mm y bulonado S(fr)+B
7. Hormigón con fibras, 120-150 mm y bulonado S(fr)+B
8. Hormigón con fibras, >150 mm y bulonado S(fr)+B
9. Revestimiento de hormigón, CCA

Figura 4. Sostenimiento a partir del Q de Barton

3 DESCRIPCIÓN DE CAMPO

3.1 Descripción del túnel la Herradura

El túnel la Herradura se encuentra ubicado en chorrillos, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 5: Ubicación del túnel la Herradura.



Figura 6: Vista del túnel la Herradura.

El macizo rocoso presente en este lugar se caracteriza por ser de naturaleza pétreo pseudometamórfica del tipo lutita pizarrosa.

Entre las características geomorfológicas tenemos a las lomas y cerros testigos, que principalmente en ellas encontramos lutitas pizarrosas y arenisca silicificada como se aprecian en las siguientes figuras.



Figura 7: Lutitas pizarrosas



Figura 8: Areniscas silicificadas

3.2 TOMA DE DATOS

Se tomaron diversos datos de ángulo de buzamiento con dirección de buzamiento en varios planos de falla, para determinar las familias de discontinuidades a lo largo del túnel.



Figura 9: Medición de buzamiento y dirección de buzamiento

Medición de la resistencia de la matriz rocosa en forma cualitativa. Vemos que la llave no raya a la roca, por lo que esperamos que tenga una dureza mayor a 3.5 en la escala de Mohs.



Figura 10: Medición cualitativa de la resistencia de la matriz rocosa

Además se distinguieron 3 estaciones geomecánicas separadas por 2 fracturas producto de los fenómenos geológicos.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES CONSIDERADAS

Estación Geomecánica E-1.- Esta estación se encuentra ubicada en el hastial izquierdo, el macizo rocoso está representada por las diaclasas existentes en las areniscas silicificadas, pertenecientes a la formación herradura, presenta tres discontinuidades principales con Dirección de Buzamiento y Buzamiento DB 350° BUZ 75, DB 87° BUZ 77 y DB 305° BUZ 87, con resistencia a la compresión de 80 Mpa, calidad de la roca equivalente a 57 %, con espaciamiento de 0.45 m, persistencia de 0.50 m, con abertura promedio de 2 mm.

Estación Geomecánica E-2.- Esta estación se encuentra ubicada en el hastial izquierdo, el macizo rocoso está representada por las diaclasas existentes en las areniscas silicificadas, pertenecientes a la formación herradura, presenta tres discontinuidades principales con Dirección de Buzamiento y Buzamiento DB 350° BUZ 75, DB 87° BUZ 77 y DB 305° BUZ 87, con resistencia a la compresión de 80 Mpa, calidad de la roca equivalente a 55 %, con espaciamiento de 0.35 m, persistencia de 0.40 m, con abertura promedio de 2 mm.

Estación Geomecánica E-3.- Esta estación se encuentra ubicada en el hastial izquierdo, el macizo rocoso está representada por las diaclasas existentes en las areniscas silicificadas, pertenecientes a la formación herradura, presenta tres discontinuidades principales con Dirección de Buzamiento y Buzamiento DB 350° BUZ 75, DB 87° BUZ 77 y DB 305° BUZ 87, con resistencia a la compresión de 80 Mpa, calidad de la roca equivalente a 57 %, con espaciamiento de 0.45 m, persistencia de 0.50 m, con abertura promedio de 2 mm.

4 RESULTADOS

4.1 VALORIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RMR

Para la Estación Geomecánica E-1

Valor del RMR Básico de 70
Valor del RMR Ajustado 58 que es equivalente a una clase III equivalente a una roca regular
Cohesión (Kpa)= 350
Fricción (ϕ)= 40.0°

Para la Estación Geomecánica E-2

Valor del RMR Básico de 71
Valor del RMR Ajustado 59 que es equivalente a una clase III equivalente a una roca regular
Cohesión (Kpa)= 355
Fricción (ϕ)= 40.5°

Para la Estación Geomecánica E-3

Valor del RMR Básico de 70
Valor del RMR Ajustado 58 que es equivalente a una clase III equivalente a una roca regular.
Cohesión (Kpa)= 350
Fricción (ϕ)= 40.0°

4.2 Valorización del Índice Q de Barton

Para la Estación Geomecánica E-1

Donde:

$$RQD = 57, J_n = 9, J_r = 1.5, J_a = 1, J_w = 1, SRF = 2.5$$

$$Q = 57 \times 1.5 \times 1 / 9 \times 1 \times 2.5 = 4.6$$

$$\text{Altura túnel/ESR} = 6 / 1.2 = 5$$

Considerando el Q y la relación entre la altura de túnel y ESR obtenemos de la Fig. 4 que la categoría de sostenimiento corresponde al tipo 3 que equivale a la colocación de pernos sistemáticos.

Donde:

$$RQD = 55, J_n = 9, J_r = 1.5, J_a = 1, J_w = 1, SRF = 2.5$$

$$Q = 55 \times 1.5 \times 1 / 9 \times 1 \times 2.5 = 3.7$$

$$\text{Altura túnel/ESR} = 6 / 1.2 = 5$$

Considerando el Q y la relación entre la altura de túnel y ESR obtenemos de la Fig.4 que la categoría de sostenimiento corresponde al

tipo 4 que equivale a la colocación de pernos sistemáticos con hormigón proyectado de 40 a 100 mm

Donde:

$$RQD = 57, J_n = 9, J_r = 1.5, J_a = 1, J_w = 1, SRF = 2.5$$

$$Q = 57 \times 1.5 \times 1/9 \times 1 \times 2.5 = 4.6$$

$$\text{Altura túnel/ESR} = 6/1.2 = 5$$

Considerando el Q y la relación entre la altura de túnel y ESR obtenemos de Fig 4 que la categoría de sostenimiento corresponde al tipo 3 que equivale a la colocación de pernos sistemáticos.

4.3 Análisis mediante el software DIPS

Se ingresaron los datos de campo al software, obteniendo los polos de los planos de discontinuidad en la proyección estereográfica.

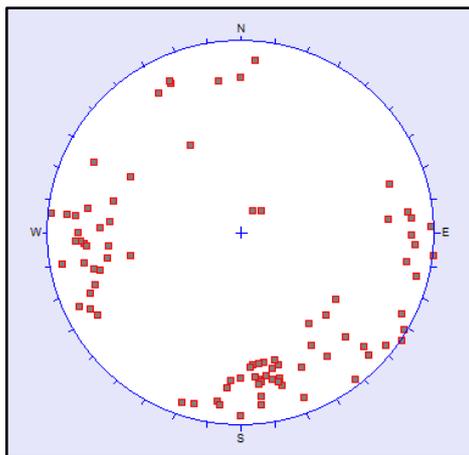


Figura 11: Representación de planos de discontinuidad en el software DIPS

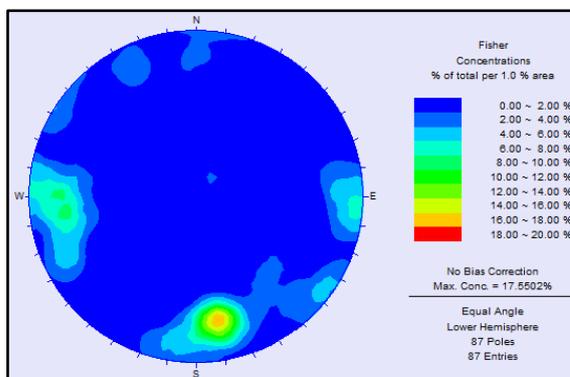


Figura 12: Representación de planos de discontinuidad mediante concentraciones en el software DIPS

Se introduce el plano del túnel obtenido a partir del buzamiento y la dirección de

buzamiento. Asimismo, se obtienen los planos principales de discontinuidad, cuyas medidas están indicadas en el Cuadro 6.

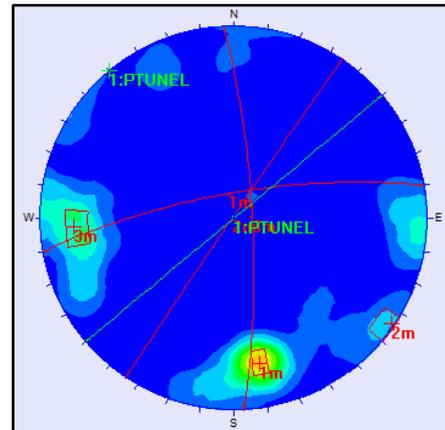


Figura 13: Representación de planos

Cuadro 6

PLANO	BUZAMIENTO	DIR BUZ
P1	75	350
P2	88	304
P3	79	87
PTUNEL	90	140

4.3.1 Análisis de falla por desplome

A partir de los datos RMR, obtenemos el ángulo de fricción para el macizo rocoso el cual es aproximadamente 41°.

Para el análisis de Desplome, se introduce un cono de falla en el software DIPS, además de un plano límite para definir la ocurrencia de falla, el cual es un plano con la dirección de buzamiento perpendicular a nuestro Plano Túnel. La generación de la zona achurada encierra unos polos que indican el peligro de ocurrencia de una falla por desplome en el macizo rocoso evaluado del túnel La Herradura.

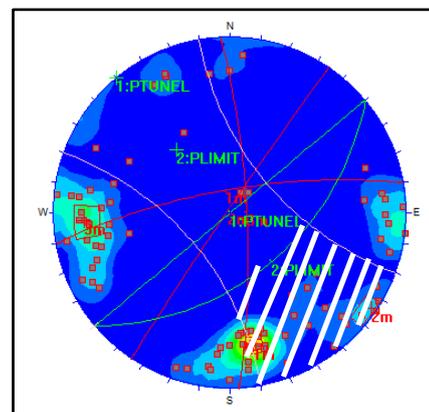


Figura 14: Cono de falla por desplome.

4.3.2 Análisis de falla por cuña

A partir de los datos RMR, obtenemos el ángulo de fricción para el macizo rocoso el cual es aproximadamente 41° .

Para el análisis de falla por cuña, se introduce un cono de falla en el software DIPS. La generación de la zona achurada encierra unos polos que indican el peligro de ocurrencia de una falla por cuña en el macizo rocoso evaluado en el túnel La Herradura.

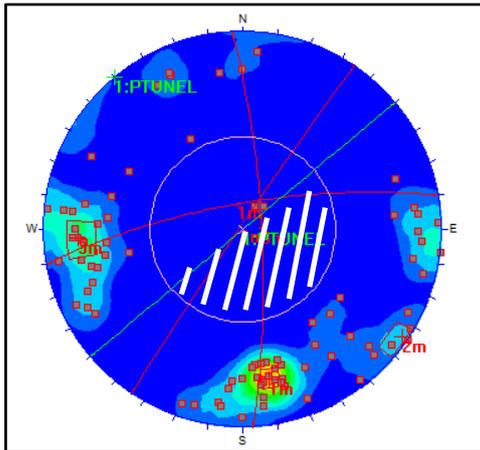


Figura 15: Cono de falla por cuña

4.4 Medidas de Sostenimiento

Una vez analizado el túnel La Herradura mediante el software DIPS, procedemos a obtener soluciones para darle mayor estabilidad al túnel.

La altura del túnel es 6m, mientras que el ESR para un túnel vial es de 1.2, entonces la altura/ESR equivale a 5m.

Para la Estación Geomecánica E – 2 en la zona central del túnel, el $Q = 3.7$, con este dato ingresamos a la tabla que se muestra en la Figura 4, obteniendo que la medida de sostenimiento es pernos sistemáticos, lo cual era esperado. Por otro lado, en la Estación Geomecánica E – 1 y E – 3, el $Q = 4.6$ nos indica pernos sistemáticos con shotcrete, como se ha realizado.

5 CONCLUSIONES

- Dadas las condiciones geológicas del lugar, el túnel fue trazado con mucho criterio ingenieril, brindado una buena solución técnico-económica.
- A mayor sección mayor inestabilidad, lo cual se corrobora en campo porque

tanto el portal de salida como el de entrada son de una sección mayor que la parte central del túnel y han requerido mayores medidas de sostenibilidad (Bulbonado Sistemática + Hormigón lanzado vs Bulbonado Sistemático)

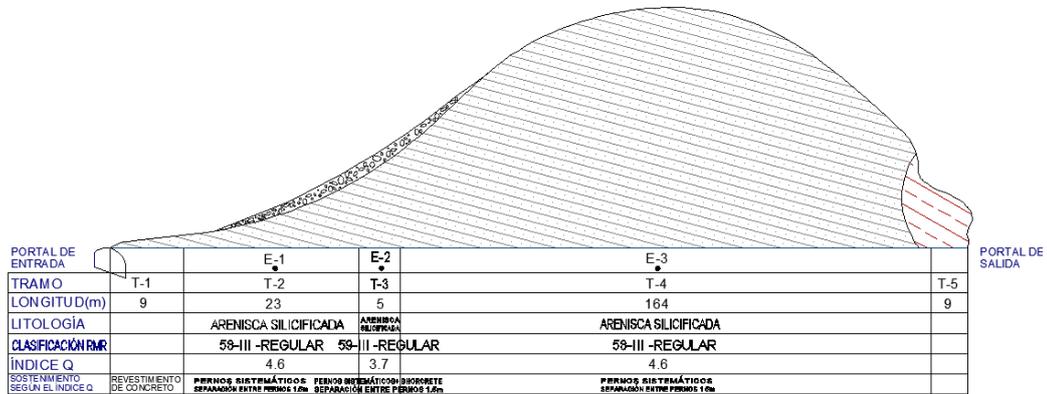
- El análisis de las Estaciones Geomecánicas E-1 y E-3 fue muy similar y la Est. Geomecánica E-2 obtuvo mayores de resistencia, lo que coincide con lo observado en el túnel en la visita de campo.
- Se observó que el análisis de fallas en el software DIPS coincidió con los tipos de falla que esperábamos obtener a partir de la visita campo.
- La tabla de medidas de sostenibilidad que relaciona altura vs Q de Barton, vemos que es muy útil y coincide con el RMR dando calidades de roca acordes a la solución, relacionando ambas teorías de manera lógica.
- Las medidas de sostenimiento optadas por el Ingeniero de la obra, han sido acertadas y han brindado una mayor estabilidad y seguridad al túnel.
- La evaluación del túnel requiere un buen trabajo de campo para obtener un análisis correcto de la realidad.

6 BIBLIOGRAFIA

1. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). Underground Excavation in Rock. Stephen Austin and Sons Ltd. Hertford England.
2. Bieniawski Z.T. , Engineering Rock Mass Classifications. John Willey & Sons Goodman Ry G Shi, Block Theory and its application to rock engineering. Prentice Hall New York 1985.
3. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications, Ed. John Willey & Sons Nueva York 1989.

4. Goodman R y E (1989) Introduction to Rock Mechanics. 2nd Edition. John Willey & Sons.
5. Geología del cuadrángulo de Lima, Boletín No.41, INGEMMET, 1986.
6. Goddman, Richard E. "Introduction to Rock Mecanics" John Willey & Sons, 1989.
7. Gonzalez de Vallejo, Luis "Ingeniería Geológica" Prentice may, 2002.
8. Hoek E., Bray J.W. 1977, "Rock Slope Engineering", London, 2da. Edición.
9. Hoek E., Brown E.T. 1985, "Excavaciones Subterráneas en Rocas ", McGraw Hill, México.
10. Robles Espinoza, Neri H. "Excavación y Sostenimiento en túneles" CONCYTEC, Lima 1994.

ANEXO 1 PERFIL DE TÚNEL



ANEXO 2: PARÁMETROS DE VALORACIÓN DE ÍNDICE Q DE BARTON

1. RQD		Valoración
A	Muy Mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-70
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100

2. Jn		Valoración
A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuración escasa	0.5-1.0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o mas familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa.	20

3. Jr		Valoración
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad o inferior a 10 cm.		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas e irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1.0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0.5
b) No existe contacto		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad.	1.0
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad.	1.0

4. Ja		Valoración
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad o aberturas menores a 5 cm.		
A	Discontinuidad cerrada, cuarzo.	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	1.0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	2.0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3.0
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc.	4.0
b) Abertura entre planos de discontinuidad de 5 cm a 10cm		
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	4.0
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos.	6.0
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos.	8.0
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita.	8-12
c) Aberturas mayores a 10 cm.		
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G,H, y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6,8 ó 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles.	5.0
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G,H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	10,13 ó 13-20

5. Jw		Valoración
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5l/min., de forma localizada.	1.0
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades.	0.66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno.	0.5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas.	0.33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo.	0.2-0.1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable.	0.1-0.05

6. SRF		Valoración
a) Las zonas débiles en rocas competentes.		
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $\leq 50m$)	5
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $> 50m$)	2.5
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libre de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)	7.5
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas), (profundidad de la excavación $\leq 50m$)	5.0
F	Zonas de fracturas aisladas en roca competente (libre de arcillas), (profundidad de la excavación $> 50m$)	2.5
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5.0
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	1
K	Tensiones elevadas, estructura, muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	200-400
c) Rocas deformables.		
O	Presión de deformación baja	5-10
P	Presión de deformación alta	10-20
d) Rocas expansivas.		
R	Presión de expansión baja	5-10
S	Presión de expansión alta	10-15

ANEXO 3:

PARÁMETROS DE VALORACIÓN DE ÍNDICE Q DE BARTON

1	Resistencia De la matriz Rocosa (MPa)	Ensayo de Carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
			Puntuación	20	17	13	6	3	
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
			Puntuación	20	15	10	8	5	
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Características geotécnicas

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15m de vano	6 meses con 8m de vano	1 semana con 5m de vano	10 horas con 2,5 m de vano	30 min. con 1m de vano
Cohesión	>4Kg/cm ²	3-4Kg/cm ²	2-3 Kg/cm ²	1-2 Kg/cm ²	<1Kg/cm ²
Ángulo de rozamiento	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

Orientación de las discontinuidades en el túnel

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20°. Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45-90	Buz. 20.45	Buz.45-90	Buz.20-45	Buz.45-90	Buz.20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable