

Caracterización geomecánica y tratamientos en los túneles de desvío en la margen izquierda del P. H. Las Cruces, Nayarit



El Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces (P. H. Las Cruces) forma parte del Sistema Hidrológico San Pedro-Acapoetla, que comprende 12 proyectos –cinco de ellos sobre el río San Pedro–, con un potencial de generación de 1 575 MW. El P. H., está constituido de una cortina de concreto compactado con rodillo (CCR) de 185 m de altura y de aproximadamente 850 m de longitud con una capacidad instalada de 480 MW en cuatro turbinas ubicadas en la zona del cauce. La obra de desvío está garantizada por dos túneles de sección portal alojados en la margen izquierda, ambos con dimensiones de 14x14 m; mientras que el vertedero es una estructura dividida en 4 vanos controlados por compuertas radiales de 20x12 m.

Alemán Velásquez Juan de Dios
Subgerente de Geotecnia y Materiales
GEC, CFE

Chablié Moreno Julio César
Ingeniero de Proyecto
DMR, GEC, CFE

Talonia Vargas Ulises
Jefe de Oficina de Mecánica de Rocas
GEC, CFE

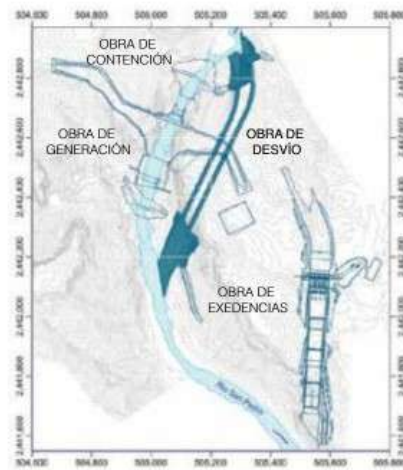
Mendieta Torres Gerardo
Ingeniero de Proyecto
DMR, GEC, CFE

Descripción del proyecto

La obra de desvío del P. H. Las Cruces está constituido por dos túneles sección portal alojados en la margen izquierda, ambos con dimensiones de 14x14 m; el túnel uno (1) tiene una longitud de 694 m y el túnel dos (2) una longitud de 838 m aproximadamente. Regionalmente, se localiza en la Sierra Madre Oriental –en la porción Central del estado de Nayarit y en la parte baja de la cuenca del río San Pedro–, a 65 km y a 30° al Noroeste de la ciudad de Tepic. En la figura 1.1 se presenta el arreglo de las obras y se remarca en color oscuro el trazo de los túneles de desvío.

Características geológicas del sitio

En el sitio propuesto para la construcción del proyecto afloran rocas ígneas extrusivas de la Secuencia Ignimbérica del Nayar. Geológicamente se identificaron en este sitio dos unidades, a las cuales se les denominó como unidad Las Cruces y unidad Corapan, las cuales se presentan pseudoestratificadas. Estas unidades se encuentran afectadas por fallas y fracturas; en algunas de ellas, se generaron las condiciones propicias para el emplazamiento de diques de composición diabásica o pórfido andesítica. Las unidades antes mencionadas están cubiertas parcialmente por depósitos no consolidados en forma de suelo residual (Qsr), depósitos de talud (Qdt) y aluvión (Qal).



▲ Figura 1. Ubicación de los túneles de desvío.

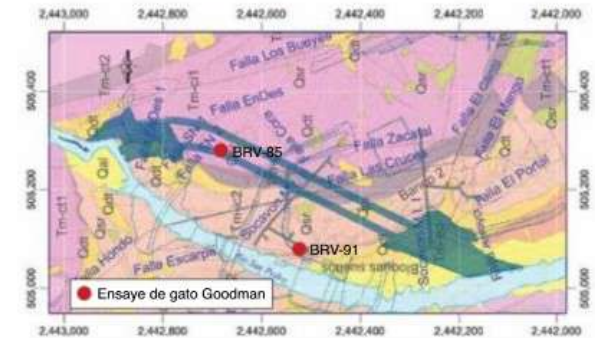
En la figura 2 se presenta la planta geológica del sitio, en la que se observan en achurado las trazas en planta de los túneles de desvío, las fallas principales y la posición espacial de las unidades geológicas antes mencionadas y en la figura 3 se muestra una sección transversal al río, sobre el eje de cortina en el que se observa la posición de los túneles de desvío y las diferentes unidades geológicas existentes en el sitio.

Litología

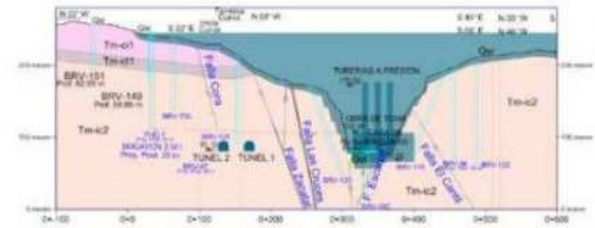
En la zona del proyecto están expuestos dos potentes paquetes de rocas piroclásticas, basculadas hacia aguas arriba (NE), que constituyen las unidades litológicas Las Cruces y Corapan.

La unidad Corapan está formada por Ignimbritas (Tm-ci1, figuras 2 a 5) de coloración gris clara, textura piroclástica, compuesta por feldespatos potásicos, plagioclasas, cuarzo y ferromagnesianos; le subyace una Toba (Tm-ci1) de color rojizo, textura piroclástica, estructura compacta con fragmentos angulosos de ignimbrita riolítica de diversos tamaños.

Las rocas que pertenecen a la unidad Las Cruces (Tm-ic2; figuras 2 a 5), corresponden a ignimbritas de composición riolítica, de estructura masiva y textura piroclástica e incluyen un paquete de textura fina en la parte intermedia (Tm-ic2a). Las rocas de la parte superior se caracterizan por su aspecto vesicular, a veces amigdaloides (Tm-ic2b), producto de la alteración de los fragmentos de pómez, los feldespatos



▲ Figura 2. Planta geológica de obra de desvío.



▲ Figura 3. Sección geológica por el eje de la cortina.

o algunos fragmentos líticos, mientras que las de la porción inferior (Tm-ic2c) corresponden a ignimbritas riolíticas de estructura fluidal.

En las figuras 4 y 5 se presentan las secciones geológicas longitudinales por el eje de cada uno de los túneles y se aprecian las diversas litologías que serán atravesadas por la excavación de los mismos.

En primer término, las excavaciones iniciarán cortando una toba lítica de color gris compacta de unos 30 m de espesor aproximadamente. Posteriormente, se tendrá un cambio en la coloración de la misma, pasando a ser una ignimbrita silicificada de color rojizo de unos 15 m de espesor; bajo esta capa se tendrá un aumento gradual en la densidad de las vesículas y donde se contempla un espesor de al menos 100 m. Finalmente, se tendrá una ignimbrita de color grisáceo con fiammes en una roca de estructura fluidal con una disminución importante en la densidad vesicular.

Caracterización geotécnica

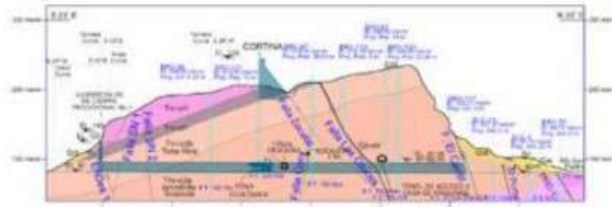
Con la finalidad de definir las propiedades del macizo rocoso, se definieron siete zonas con condiciones geotécnicas similares sobre el trazo de los túneles. Como referencia se tomaron los perfiles geológicos mostrados en las figuras 3 a 5, las condiciones estructurales del macizo rocoso; la caracterización de la roca intacta y de las juntas.

Condición geológica estructural

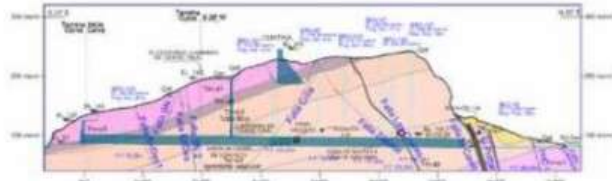
Las fallas principales en la zona de la boquilla son de tipo normal con dirección preferencial NW-SE con buzamiento al SW y unas segundas de dirección NE-SW con buzamiento al SE. La mayoría de las fallas cartografiadas tienen como característica el emplazamiento de diques de composición diabásica o andesítica a profundidad.

Basado en la información geológica-geotécnica disponible, en la zona superficial (Corapan) se definieron tres zonas geotécnicas (TDC-01 a TDC-03), las cuales se indican en la tabla 1, y en ella se muestran los sistemas de fracturamiento presentes en cada zona. La figura 6 muestra la zonificación propuesta en planta.

En la unidad Las Cruces se realizó una zonificación a partir de los levantamientos geotécnicos superficiales y de las estructuras geológicas (fallas) presentes en el sitio. En esta unidad se identificaron cuatro zonas geotécnicas, mismas que se observan en la figura 7 y en la tabla 2; donde se indican los sistemas de fracturamiento existentes en cada una de ellas.



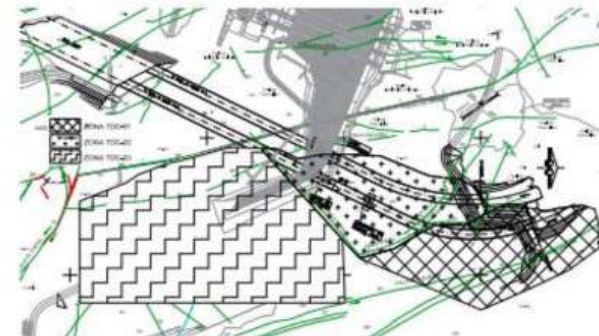
▲ Figura 4. Sección Geológica por eje del túnel de desvío 1.



▲ Figura 5. Sección Geológica por eje del túnel de desvío 2.

Zona	Localización	Sistemas de Fracturamiento	Espaciamiento (m)
TDC-01	Portal de entrada del túnel de desvío 2	S1: N24°W/90° S2: N76°W/80°NE S3: N43°E/86°NW	6 3 12
TDC-02	Entre fallas EnDes y Cora	S1: N06°W/87°NE S2: N46°W/79°SW S3: N52°E/85°NW	6 3 12
TDC-03	Entre las fallas Cora y Las Cruces	S1: N09°E/80°SW S2: N66°W/85°SW S3: N41°E/83°NW	6 3 12

▲ Tabla 1. Zonificación de la unidad Corapan.



▲ Figura 6. Vista en planta de la zonificación de la unidad Corapan.

Caracterización de la roca intacta

De los núcleos recuperados en la campaña de exploración directa, se eligieron muestras sanas sin alteración y sin fracturas para realizar sobre ellas los ensayos índice y mecánicos para caracterizar así a los diferentes macizos rocosos. Los resultados de estos ensayos se presentan en las tablas 3 y 4.

Para evaluar el comportamiento que tiene la roca intacta ensayada en cuanto a esfuerzo –deformación, se realizaron pruebas de laboratorio de resistencia a la compresión simple con obtención de módulo de elasticidad. Con los resultados obtenidos, se clasificaron las unidades geológicas mediante el empleo del criterio de Deere y Miller con la finalidad de establecer su comportamiento a partir de dos de sus propiedades importantes: la resistencia a compresión simple y el módulo tangente al 50% del esfuerzo último.

La envolvente de resistencia de cada una de las unidades geotécnicas se definió a partir de los resultados de los ensayos mecánicos efectuados; considerando además de la resistencia a compresión simple, el comportamiento triaxial y de resistencia a la tensión. Con estos resultados, se determinó la envolvente de resistencia y se establecieron los parámetros de la envolvente con el criterio de Hoek y Brown.

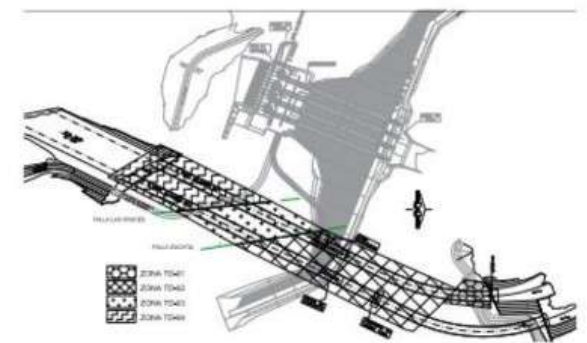
Tomando en cuenta la estadística de los resultados de pruebas índices y mecánicas de laboratorio y el tipo de roca del sitio; se calcularon los parámetros equivalentes de resistencia de la roca intacta (Mohr-Coulomb) de las unidades geológicas correspondientes (tabla 4).

Caracterización de las discontinuidades

Para la caracterización de las discontinuidades en contacto roca-roca, se utilizó el criterio de Barton-Choubey, el cual considera la rugosidad de las discontinuidades, la alteración de las paredes de las mismas, la resistencia a la compresión

Zona	Localización	Sistemas de Fracturamiento	Espaciamiento (m)
TD-01	Portal de entrada del túnel de desvío 1	S1: N23°W/75°SW S2: N59°W/70°SW S3: N48°E/89°SE	6 3 12
TD-02	Al bajo de la falla Zacatal	S1: N07°W/86°NE S2: N35°W/69°SW S3: N75°E/84°SE	6 24 8
TD-03	Entre las fallas Zacatal y Las Cruces	S1: N09°E/70°NW S2: N39°W/70°SW S3: N58°E/83°SE	18 4 14
TD-04	Al alto de la falla Las Cruces	S1: N09°E/70°NW S2: N39°W/70°SW S3: N58°E/83°SE	11 5 4

▲ Tabla 2. Zonificación de la unidad Las Cruces.



▲ Figura 7. Vista en planta de la zonificación de la unidad Las Cruces.

Propiedades índice	Tm-ci1	Tm-ct1	Tm-ic2-b	Tm-ic2-a	Tm-dd
Contenido de agua (%)	5	4	3	6	9
Peso volumétrico ambiente (kN/m3)	21	22	22	22	19
Peso volumétrico saturado (kN/m3)	22	23	23	23	21

▲ Tabla 3. Valores promedio de propiedades índices de la roca intacta.

Litología	Descripción	σ_d (MPa)	E_{50} (MPa)	σ_1 (MPa)	Clasificación D & M	m_i (adm)	c (MPa)	ϕ (°)
Tm-ci1	Corapan, Ignimbrita	67	19,031	6	CM	17	13	48
Tm-ct1	Corapan, Toba riolítica	67	18,931	7	CM	15	11	49
Tm-ic2-b	Las Cruces, Toba lítica	94	28,142	9	CM	10	16	56
Tm-ic2-a	Las Cruces, Ignimbrita vesicular	76	26,724	6	CM	13	13	42
Tm-dd	Dique diabásico	32	17,801	6	DH	6	7	44

▲ Tabla 4. Resultados de parámetros de resistencia de la roca intacta.

Sistema	Tipo de ángulo de Fricción (°)	Unidad Corapan			Unidad Las Cruces			
		TDC-01 Tm-ci1	TDC-02 Tm-ci1	TDC-03 Tm-ci1	TD-01 Tm-ic2-b	TD-02 Tm-ic2-a	TD-03 Tm-ic2-a	TD-04 Tm-ic2-a
S1	φ (Residual)	30	28	30	32	29	32	30
	φ (máximo)	38	39	39	41	40	40	41
S2	φ (Residual)	30	29	29	31	30	30	29
	φ (máximo)	39	39	39	41	40	40	40
S3	φ (Residual)	30	28	28	31	29	31	31
	φ (máximo)	39	38	39	41	40	40	40

▲ Tabla 5. Ángulo de fricción residual y máximo para las discontinuidades en las zonas de las unidades Corapan y Las Cruces.

uniaxial en los labios de las juntas, el estado de esfuerzos y la fricción desarrollada en los planos.

Durante el levantamiento de las discontinuidades se realizaron pruebas con el esclerómetro y se midieron los valores de las rugosidades y resistencias obtenidas (JRC y JCS); además, se normalizaron respecto a la longitud de las juntas reales para escalarlas al macizo rocoso.

Como resultado de esta caracterización, se obtuvieron los ángulos de fricción interna residual y máximo para cada uno de los sistemas de discontinuidades presentes en las diversas zonas de las unidades Corapan y Las Cruces (tabla 5).

Clasificaciones geomecánicas

A fin de complementar la zonificación geotécnica del macizo rocoso, se llevaron a cabo levantamientos geomecánicos, localizados en las dos unidades litológicas (Corapan y Las Cruces). Estos levantamientos geomecánicos se realizaron con la metodología propuesta por Deere (RQD, 1966), Bieniawski (RMR, 1989), Hoek (GSI, 2002), Barton (Q, 2002) y Palmstrong (Rmi, 1995). En la tabla 6 se muestran los índices de calidad de la roca obtenidos.

Ensayo de Gato Goodman

Se realizaron ensayos de gato Goodman en barrenos exploratorios, los cuales permitieron en conjunto con los ensayos de placa flexible, gato plano y sísmico, definir los módulos de deformabilidad de las diferentes unidades presentes en el sitio.

Derivado de la prueba de gato Goodman, se calcularon los resultados para cada tramo y para cada unidad geotécnica; los resultados se muestran en la tabla 7.

N°	Zona	RQD (%)	RMR (adm)	GSI (adm)	Índice Q (adm)	Rmi (adm)
Unidad Corapan						
1	TDC-01	71	79	74	22.3	105.5
2	TDC-02	25	70	65	6.3	105.5
3	TDC-03	42	70	65	10.5	105.5
Unidad Las Cruces						
1	TD-01	78	83	78	19.5	135.3
2	TD-02	91	86	81	22.8	207.3
3	TD-03	94	86	81	23.5	197.1
4	TD-04	95	87	82	31.7	110.7

▲ Tabla 6. Índices de calidad de roca por zonas.

Unidad Geológica	Unidad Geotécnica	Barreno N°	Módulo de carga (MPa)	Módulo de descarga (MPa)
Tm-ci1	Ug-1c	BRV 85	10,078	11,688
Tm-ic2-b	Ug-2a-2		8,950	9,416
Tm-ic2-a	Ug-2a-1	BRV 91	13,781	20,480

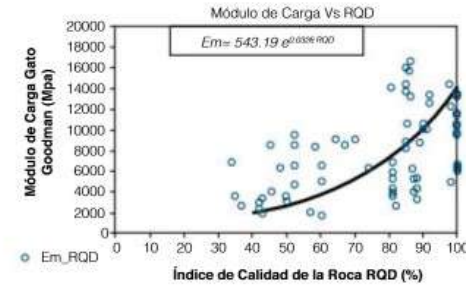
▲ Tabla 7. Resultados de la prueba de gato Goodman.

Propiedades del macizo

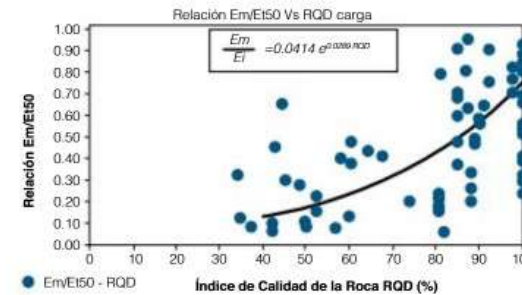
Obtenidos los resultados de módulo de deformabilidad de cada tramo, se promediaron por punto de prueba para, finalmente, obtener el módulo promedio por unidad geotécnica para la etapa de carga.

Derivado de los resultados de la pruebas analizadas, se procedió a graficar el

módulo de carga vs el índice de calidad de la roca (RQD). En la gráfica 1 se muestra la dispersión de los datos y un ajuste que facilitará conocer de manera rápida el módulo de carga en función del RQD. En la gráfica 2 se presenta la correlación del RQD vs la relación de los módulos Em/E150.



▲ Gráfica 1. Módulo de carga gato Goodman vs RQD.



Para determinar los valores de los parámetros de resistencia basados en el criterio de Mohr- Coulomb (c y φ) para cada una de las unidades geotécnicas, se calcularon las constantes de calidad (mb, s, a) representativas del macizo rocoso a través del criterio de Hoek-Brown en conjunto con los valores de GSI (Geological Strength Index) determinados en los levantamientos geomecánicos mostrados anteriormente.

Los parámetros de deformabilidad se definieron a partir de la comparación de los resultados de las pruebas mecánicas de campo (ensayo de gato Goodman) y aplicación de fórmulas empíricas; teniendo como resultado que el uso de la ecuaciones propuestas por Nicholson y Bieniawski (1990) y la de Hoek y Diederichs (2006), con un factor de alteración D=0.5, son las más cercanas para escalar el módulo de elasticidad de la roca intacta al macizo rocoso, como se ilustra en la gráfica 3. En la tabla 8 se muestran las propiedades del macizo rocoso determinadas.

▲ Gráfica 2. Relación módulo de carga gato Goodman / módulo de la roca intacta vs RQD.

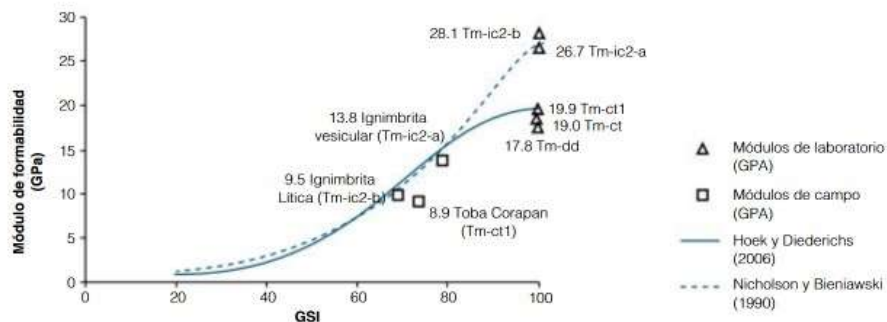
Zonas geotécnicas	Unidad geológica	Descripción	Propiedades del macizo rocoso								
			Índices de calidad de la roca		Constantes del macizo			Cohesión c (MPa)	Ángulo de fricción (°)	Módulo de deformabilidad	
			RQD (%)	GSI	mb	s	a				
TDC-01 TDC-02	Tm-ci1	Unidad Corapan, Ignimbrita	80	74	4.817	0.0312	0.501	2.7	57	32	10,941*
TDC-03	Tm-ci1	Unidad Corapan, Toba Riolitica	80	74	3.697	0.0209	0.501	1.7	54	20	9,516* 8,905**
TD-02 TD-03 TD-04	Tm-ic2-a	Unidad Las Cruces, Ignimbrita Vesicular	91	79	6.815	0.1546	0.5	2.6	55	21	16,921* 13,731**
TD-01	Tm-ic2-b	Unidad Las Cruces, Ignimbrita Lítica sin vesículas	70	70	2.323	0.0183	0.501	2.2	53	24	11,722* 9,549**
TC-03	Tm-dd	Dique Diabásico	72	40	0.38	0.0004	0.51	0.3	33	2	1,369*

Donde:

* Módulo de deformabilidad obtenido con el criterio de Hoek-Brown

** Módulo de deformabilidad obtenido de la prueba de gato Goodman

▲ Tabla 8. Propiedades del macizo rocoso.



▲ Gráfica 3. Deformabilidad del macizo rocoso.

Frente	Zona	Túnel N°	Tipo	Talud	Anclaje				Drenes		
					Varilla		Arreglo	Concreto Lanzado	PCV		Arreglo
					Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)			Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	
PE	TDC-01	1	TA	Vertical	1	3	4x4	6x6-10/10 - 0,1	3	3	4x4
	TDC-02	1 y 2			1	3	4x4	6x6-10/10 - 0,1	3	3	4x4
	TD-01	2			TB	0.25:1	1	3	4x4	6x6-10/10 - 0,1	3

▲ Tabla 9. Tratamientos en el portal de entrada de los túneles de desvío.

Tratamientos geotécnicos

De acuerdo con la zonificación geotécnica, se definieron los tratamientos para la obra de desvío; los cuales se describen a continuación.

Portal de entrada

El portal de entrada (PE) del túnel de desvío No. 1 se encuentra dentro de la zona superficial TDC-01; mientras que el túnel No. 2 se encuentra en ambas zonas (superficial y subterránea), TDC-02 y TD-01 en la que se definieron en dos tipos de tratamientos (TA y TB), los cuales se describen a continuación en la tabla 9.

Portal de salida

Los portales de salida (PS) de ambos túneles de desvío se encuentran dentro de la zona subterránea TD-04 en la que, de igual manera, se definieron dos tipos de tratamientos (TC y TD), los cuales se describen a continuación en la tabla 10.

Túneles de desvío

Los túneles de desvío (1 y 2) se encuentran dentro de la zona subterránea (TD-01 a TD-04). En función de dichas zonas se definieron dos tipos de tratamientos (T1 y T2): el primero, para una roca de regular a buena calidad con un valor de RMR mayor a 40 (zonas TD-02 y TD-04); el segundo, para una roca de mala calidad RMR < 40 (zonas TD-01 y TD-03) o en zonas de fallas, en la cual se utilizará el tratamiento de marcos metálicos. A continuación se describen, en la tabla 11, los tipos de tratamientos para dichas zonas.

Frente	Zona	Túnel N°	Tipo	Talud	Anclaje				Drenes		
					Varilla		Arreglo	Concreto Lanzado	PCV		Arreglo
					Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)			Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	
PS	TD-04	1 y 2	TC	0.25:1	1	3	3,5x3,5	6x6-10/10 - 0,1	3	3	4x4
					1	3	4x4	6x6-10/10 - 0,1	3	3	4x4

▲ Tabla 10. Tratamientos en el portal de salida de los túneles de desvío.

Frente	Zona	Tipo	Marcos Metálicos	Carga (t/m²)	Anclaje				Drenes		
					Varilla		Arreglo	Concreto Lanzado	PCV		Arreglo
					Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)			Diámetro (Pulg.)	Longitud (m)	
Túnel 1-2	TD-02	T1	No	---	1	3	2,5x2,5	6x6-10/10 - 0,1	3	3	4x4
	TD-04				---	---	---	---	---	---	
	TD-01	T2	Si	17	---	---	---	---	---	---	---
	TD-03 y Zonas de fallas				---	---	---	---	---	---	

▲ Tabla 11. Tratamientos en los túneles de desvío.

Referencias

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Caracterización geomecánica y determinación de módulos de deformabilidad por medio del ensayo de gato Goodman en los túneles de desvío en la margen izquierda del P. H. Las Cruces, Nayarit, 14-036-SGM/R, 2015.*

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Informe geotécnico a nivel de ingeniería de detalle correspondiente a la obra de desvío del P. H. Las Cruces, Nay., 14-041-SGM/R, 2015.*

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Revisión de los Tratamientos a la roca para los Túneles de Desvío y lumbra de cierre final, P. H. Las Cruces, Nayarit., DMR-039/16, 2016.*

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Tratamientos para el pilar de roca del portal de salida de los Túneles de Desvío del P. H. Las Cruces, Nayarit., DMR-042/16, 2017.*

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Tamo B.3.4. Pruebas de campo y laboratorio.*

GONZÁLEZ DE VALLEJO, LUIS I. *Ingeniería Geológica, Editorial Pearson Prentice Hall, Pearson Educación, Madrid, España, 2002.*

BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989.*

PALMTRÖM A. RMI. *A rock mass characterization system for rock engineering purposes. Tesis de Doctorado de la Universidad de Oslo, 1995.*

ARILD PALMTRÖM. *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnels and Underground Space Technology, 2005.*

BARTON, N. & CHOUHEY, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 1/2:1-54, 1977.*

HOEK, E., CARTER, T.G., DIEDERICHS. *Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 2013.*

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C.T. *Hoek-Brown failure criterion, edition. Proc. North American Rock Mechanics Society, 2002.*

DEERE, D. U., & MILLER, R. P. *Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ. At Urbana Dept. Of Civil Engineering, 1966.*